

50376
1985
199

50376
1985
199

N° d'ordre : 370

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR INGENIEUR

par

Mohamad HAMDAN

Ingénieur U.A.B.



REACTANCES LIMITANT LES COURANTS DE CIRCULATION DES MACHINES SYNCHRONES MULTIPOLAIRES A ROTOR DECENTRE

Soutenu le 12 Juillet 1985 devant la Commission d'Examen

MM. G. SEGUIER
F. NOTELET
M. LECERCO
B. TRANNOY

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

AVANT-PROPOS

Les recherches dont les résultats sont présentés dans ce mémoire ont été effectuées au Laboratoire "Applications des Redresseurs de Puissance et Machines Electriques" de l'Université des Sciences et Techniques de Lille. Ce travail entre dans le cadre d'une étude sur la "Réduction de l'attraction magnétique radiale due au décentrement du rotor des machines synchrones" pour laquelle la Société Jeumont-Schneider et l'Université des Sciences et Techniques de Lille ont bénéficié d'un contrat du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

Le sujet a déjà été traité théoriquement et les résultats présentés dans deux thèses dont Monsieur le Professeur G. SEGUIER était le rapporteur. Il m'a donc été d'une aide très précieuse au début de mon étude expérimentale. Je le remercie et suis heureux qu'il ait accepté de présider le Jury auquel je soumetts ce mémoire.

Je tiens à témoigner ma très profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur F. NOTELET qui a dirigé mon travail avec beaucoup d'attention et de patience, me consacrant tout le temps nécessaire pour m'aider à surmonter les nombreuses difficultés auxquelles je me suis heurté.

Je remercie le Professeur B. TRANNOY de l'Institut National Polytechnique de Toulouse d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Le sujet a été proposé par la Société Jeumont-Schneider. J'exprime ma très profonde gratitude à Monsieur M. LECLERCQ, Directeur Technique Adjoint, qui représente dans le Jury cette Société.

J'ai effectué les essais au Laboratoire de Machines Electriques du Département Génie Electrique de l'Institut Universitaire de Technologie de Béthune. Je remercie le personnel de ce Département de m'avoir accueilli et beaucoup aidé dans l'exécution matérielle de certaines tâches.

J'exprime aussi ma vive gratitude à Madame C. LEMAIRE et Monsieur J. HOUZE qui ont assuré la réalisation pratique de ce mémoire.

Je tiens à remercier également Monsieur G. FAROUX, Attaché de Coopération à l'Ambassade de France au Liban, qui m'a beaucoup aidé pour venir poursuivre mes études en France, et Monsieur C. VANHAECKE, Chef du Service d'Accueil des Etudiants Etrangers du CROUS de Lille, qui a facilité la solution de tous mes problèmes d'insertion.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I- PRESENTATION DU SUJET

Dans une machine synchrone, l'induction dans l'entrefer est à l'origine de forces d'attraction magnétique s'exerçant entre surfaces statorique et rotorique. Si les deux armatures sont parfaitement centrées, la symétrie de construction entraîne l'égalité des entrefers. Pour deux pôles diamétralement opposés, portant des bobines d'excitation de même force magnétomotrice, il y a donc égalité des inductions et, au sens près, des forces d'attraction. La force d'attraction magnétique résultante stator-rotor est donc nulle.

• Mais si les axes des armatures statorique et rotorique sont parallèles et distincts, l'épaisseur de l'entrefer sous les divers pôles est différente. Cela entraîne l'inégalité des inductions sous les pôles diamétralement opposés. Les forces d'attraction s'exerçant sur ces pôles ne sont plus égales et opposées. Le rotor est soumis à une force d'attraction magnétique radiale égale à la résultante des forces de déséquilibre relatives à chaque paire de pôles.

Cette force soumet le rotor à un phénomène de fatigue dû à une flexion rotative qui s'accroît au fur et à mesure que le décentrement augmente. Cette force correspond également à une compression constante non uniforme de l'armature statorique se superposant à la contrainte pulsatoire due au défilement des pôles successifs.

C'est pour les machines synchrones à grand nombre de pôles, tels que les alternateurs des centrales hydroélectriques, que l'effet sur le stator de l'attraction radiale due au décentrement est le plus gênant. En effet, pour ces machines, l'épaisseur de l'armature statorique est faible par rapport au diamètre. L'attraction radiale peut entraîner des déformations permanentes du stator aboutissant, à la limite, à un frottement du rotor sur le stator.

- Pour ces machines synchrones à grand nombre de pôles, il est toutefois possible de réduire l'attraction magnétique radiale due au décentrement. En effet, les forces électromotrices engendrées dans les divers enroulements d'une même phase ne sont plus égales, ni en valeur efficace ni en phase. Si on groupe en parallèle les enroulements de chaque phase de l'induit, les écarts entre forces électromotrices engendrent des courants de circulation internes. Ces courants produisent dans l'entrefer une induction qui se compose avec celle créée par l'inducteur, et modifie localement la valeur de l'attraction magnétique.

Suivant le mode de couplage des voies en parallèle et leur disposition par rapport à la direction du décentrement, une réduction plus ou moins notable de l'attraction radiale résultante pourra être obtenue.

- La réduction de l'attraction magnétique radiale des machines synchrones multipolaires par couplage en parallèle des enroulements doit pouvoir être évaluée avec précision.

- Il importe en effet de savoir si le surcoût dû à certains couplages en parallèle mérite d'être engagé. Il existe en effet plusieurs couplages possibles, entr'autres celui qui consiste à grouper en parallèle deux à deux les enroulements diamétralement opposés, mais il nécessite des connexions longues donc coûteuses.

- Même en l'absence de décentrement, l'amélioration de la connaissance du rapport de la force radiale au décentrement permet de mieux analyser le comportement dynamique du groupe, dont fait partie la machine synchrone, et notamment de mieux déterminer ses vitesses critiques.

II- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Peu d'études ont été consacrées à la réduction de l'attraction magnétique radiale des machines synchrones multipolaires. Néanmoins on pourra se reporter aux thèses de S. BEN CHAABANE : "Influence du décentrement sur l'attraction magnétique radiale et sur les forces électromotrices des machines synchrones" (1) et de A. BAHRI : "Réduction de l'attraction magnétique radiale des machines synchrones par le couplage en parallèle des enroulements statoriques" (2), où l'on trouvera une étude bibliographique des travaux antérieurs. Ces deux thèses, dont nous allons faire le résumé au chapitre suivant, donnent les résultats d'une recherche qui entre dans le cadre d'une étude sur la "réduction de l'attraction magnétique radiale due au décentrement du rotor des machines synchrones" pour laquelle la Société Jeumont-Schneider et l'Université des Sciences et Techniques de Lille ont bénéficié d'un contrat D.G.R.S.T. Un rapport de fin de contrat de A. BAHRI, G. SEGUIER et A. WIART (3) et une communication de A. BAHRI, S. BEN CHAABANE, G. SEGUIER et M. LECLERCQ (4) mettent bien en valeur les résultats théoriques obtenus dans ces deux thèses et constituent une source de nouvelles études intéressantes.

Ces résultats théoriques s'approchent d'autant plus de la réalité que le nombre de pôles de la machine synchrone est élevé. Les travaux de F. NOTELET (5) puis de F. NOTELET et G. RAVALITERA (6) sur le décentrement des machines asynchrones à faible nombre de pôles peuvent être appliqués aux machines synchrones à nombre de pôles réduit, et compléteront l'étude actuelle.

III- PRESENTATION DE NOTRE ETUDE

Une machine synchrone possédant 8 pôles et un bobinage statorique à 2 couches a été construite. Elle permet un décentrement progressif du rotor par rapport au stator. Le travail qui nous a été confié consiste essentiellement à vérifier expérimentalement les résultats théoriques des thèses de S. BEN CHAABANE et de A. BAHRI, et plus particulièrement de déduire des mesures, les réactances qui limitent les courants de circulation apparaissant dans les enroulements en parallèle de chaque phase lors du décentrement du rotor. La connaissance de ces réactances et en particulier leur nature est indispensable à tout développement théorique ultérieur.

Pour que notre travail expérimental complète utilement les études théoriques antérieures, nous avons gardé les mêmes hypothèses et les mêmes simplifications de calcul. Pour que la lecture globale des travaux soit aisée, nous avons gardé les mêmes notations.

Après ce premier chapitre d'introduction, le chapitre 2 fait un résumé des travaux de S. BEN CHAABANE et A. BAHRI, en insistant tout particulièrement sur les hypothèses adoptées et les simplifications de calcul effectuées, en expliquant, compte tenu de la difficulté du sujet, la démarche suivie et en donnant, dans ces conditions, les résultats obtenus.

L'étude théorique antérieure a été faite en considérant un enroulement d'induit à 1 couche. Dans le chapitre 3 nous avons adapté celle-ci au cas d'un enroulement statorique à 2 couches, car ceci correspond à la machine synchrone qui a été mise à notre disposition en vue de l'expérimentation.

Le chapitre 4 décrit cette machine expérimentale et en fait une reconnaissance dans le cas usuel où le rotor est parfaitement centré. Nous avons insisté tout particulièrement sur la mesure de toutes les réactances dont la détermination est classique.

Le chapitre 5 constitue le principal de notre contribution. Pour différentes valeurs du décentrement, nous avons mesuré les forces électromotrices qui apparaissent aux bornes des enroulements qui constituent les diverses phases lorsque ceux-ci ne sont pas connectés entre eux, et donc lorsqu'il n'y a pas de courant de circulation. En réalisant ensuite, tour à tour, toutes les façons d'associer ces enroulements, nous avons mesuré les courants de circulation et calculé les réactances qui les limitent.

Le chapitre 6 montre la plus ou moins grande réduction de l'attraction magnétique radiale obtenue en fonction des différentes associations des enroulements constitutifs de chaque phase.

Le chapitre 7 permet de faire le point sur cette recherche. Cette conclusion fait une critique des études théorique et expérimentale. Sans négliger les aspects positifs qui se dégagent, notre étude expérimentale met en évidence des problèmes que ne laissait pas prévoir la théorie. Cela montre qu'une étude plus fine du sujet, accompagnée d'une expérimentation adaptée à celle-ci sont nécessaires.

C H A P I T R E 2

ETUDE THEORIQUE

Avant de proposer les résultats de notre étude expérimentale il nous a semblé intéressant de résumer les études théoriques de S. BEN CHAABANE et A. BAHRI. Etant donné la complexité du problème étudié, ils ont été obligés d'adopter des hypothèses et de faire des simplifications dans les calculs. Ils ont montré qu'on pouvait admettre, quand il y a décentrement du rotor d'une machine synchrone multipolaire, la constance de la force magnétomotrice due au seul inducteur et appliquée à chacun des entrefers. Puis ils ont calculé la force d'attraction magnétique radiale et les forces électromotrices induites à vide dans les enroulements de chacune des phases statoriques.

Pour obtenir la réduction de la force d'attraction magnétique radiale, la suite normale des calculs était, compte tenu du mode de connexion des enroulements de chacune des phases, de déterminer les forces électromotrices à l'origine des courants de circulation. La connaissance des réactances qui limitent ces derniers permet alors leur calcul. On peut alors déduire l'induction correspondante dans l'entrefer, puis l'induction résultante, et enfin la nouvelle valeur de l'attraction radiale. Malheureusement, même après une étude soignée des forces magnétomotrices créées par les courants de circulation, il est difficile de déterminer la valeur et même la nature des réactances qui limitent ces courants.

Il a donc semblé préférable de calculer les forces électromotrices résultantes induites dans les enroulements de chacune des phases statoriques et dues à l'inducteur et aux courants de circulation, d'en déduire l'induction résultante puis la valeur de l'attraction magnétique radiale.

I- RELATION ENTRE LE DECENTREMENT ET L'ATTRACTION MAGNETIQUE RADIALE

I.1. Variation de l'épaisseur de l'entrefer

Soient O_S le centre de l'alésage du stator de diamètre D et de longueur L , et O_R le centre du rotor autour duquel tourne celui-ci à la vitesse angulaire Ω (figure II-1).

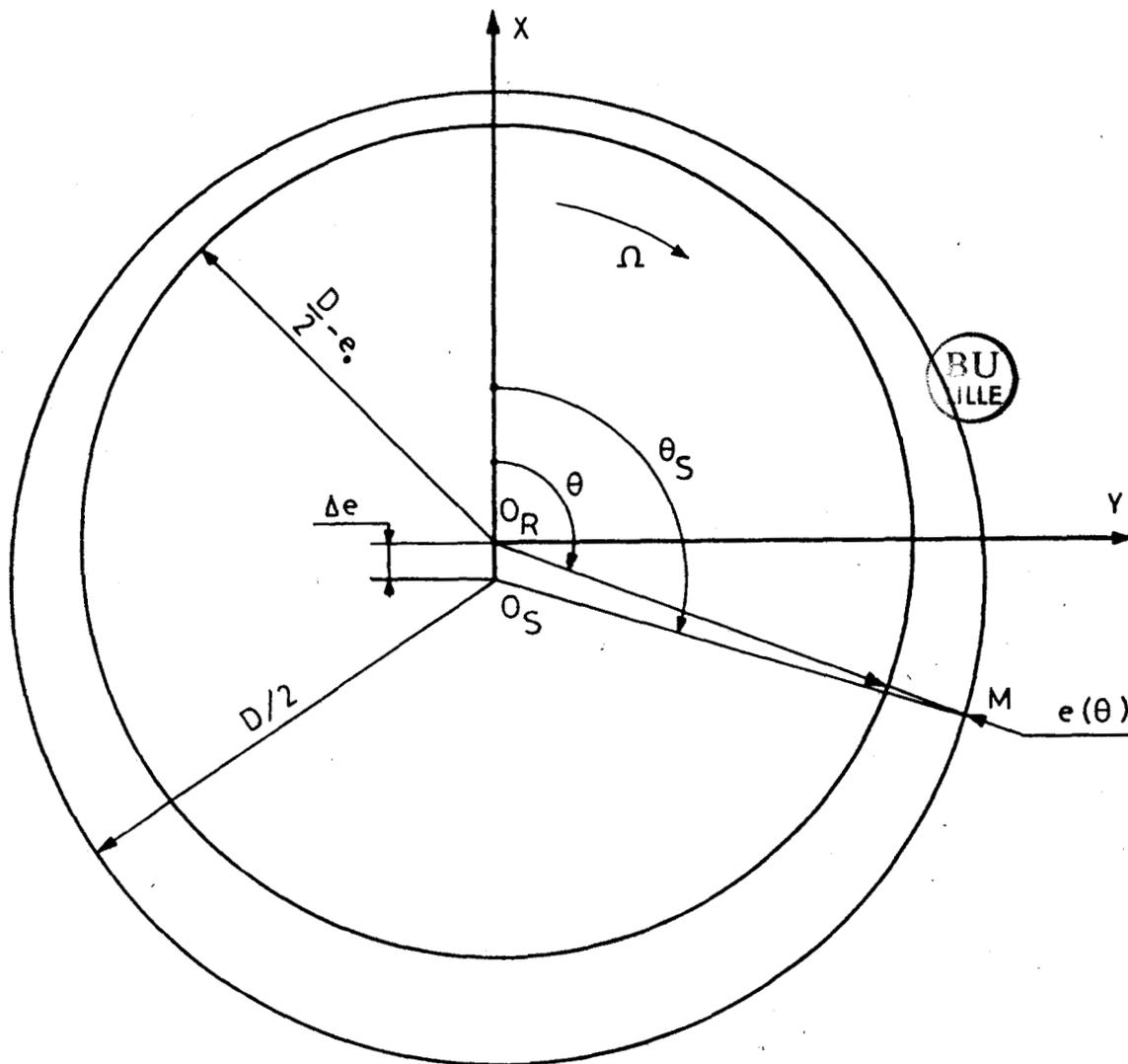


Figure II-1

On prend comme repère le système d'axes $O_R X$, $O_R Y$ tel que $O_R X$ soit dirigé suivant le décentrement $O_S O_R$ dont la valeur est Δe .

Si le rotor était lisse, en désignant par e_0 l'épaisseur de l'entrefer en l'absence de décentrement, face à un point M de la périphérie du stator, caractérisé par l'angle $(\vec{O_R X}, \vec{O_R M}) = \theta$, l'épaisseur de l'entrefer comptée suivant un rayon rotorique devient, lorsqu'il y a décentrement, $e(\theta)$ tel que :

$$e(\theta) = e_0 - \Delta e \cos \theta - \frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} - \Delta e^2 \sin^2 \theta}$$

On peut négliger $\Delta e^2 \sin^2 \theta$ devant $D^2/4$ et écrire

$$e(\theta) = e_0 - \Delta e \cos \theta \quad (\text{II-1})$$

Si on désigne par x le décentrement relatif égal à $\Delta e/e_0$, on a aussi

$$e(\theta) = e_0 (1 - x \cos \theta) \quad (\text{II-1}')$$

Pour les machines à pôles saillants, même en l'absence de décentrement, l'épaisseur de l'entrefer est variable sous les pièces polaires. Pour un point M du stator, e_0 est non seulement fonction de θ mais également du temps t . En présence d'un décentrement, l'épaisseur de l'entrefer face à un point M du stator est alors donnée par

$$e(t, \theta) = e_0(t, \theta) - \Delta e \cos \theta \quad (\text{II-2})$$

I.2. Forces magnétomotrices appliquées aux entrefers

Pour ne pas compliquer outre mesure les calculs, il a été retenu une expression simple de l'épaisseur de l'entrefer. Des hypothèses sont également nécessaires.

1) On suppose la machine non saturée et la force magnétomotrice nécessitée par le passage du flux inducteur dans le fer négligeable devant celle relative à l'entrefer.

Cette hypothèse a deux conséquences :

- la surface de l'induit et la surface des pièces polaires de l'inducteur sont considérées comme des surfaces équipotentielles au point de vue magnétique.
- c'est la réluctance des entrefers qui consomme toute la force magnétomotrice des bobines inductrices.

2) On néglige les épanouissements latéral et longitudinal du flux dans l'entrefer, en supposant que la section offerte à l'établissement du flux est égale à la surface des pièces polaires.

3) On suppose qu'avant décentrement, l'épaisseur e_0 de l'entrefer sous chaque pôle est constante et qu'après décentrement, cette épaisseur reste constante et égale à sa valeur dans l'axe du pôle. Cela équivaut à supposer constante l'induction dans l'entrefer face à chacun des $2p$ pôles.

On démontre alors les résultats suivants :

1) Quelle que soit la position du rotor par rapport à la direction du décentrement, les forces magnétomotrices appliquées aux entrefers situés sous les pôles de même nature (ϵ_N pour les pôles Nord d'une part et ϵ_S pour les pôles Sud d'autre part) sont égales.

2) Lorsqu'un axe interpolaire de l'inducteur est dans la direction du décentrement, les forces magnétomotrices des deux types de pôles sont égales. Sinon, elles diffèrent, et leur différence est maximale quand un axe polaire est dans la direction du décentrement. La force magnétomotrice appliquée à un entrefer est donc la superposition d'un terme moyen et d'un terme pulsatoire de période égale à la durée de $\frac{1}{p}$ lième de tour du rotor.

Tenir compte de ce terme pulsatoire complique tant les calculs, qu'on suppose identiques et constantes les forces magnétomotrices appliquées aux $2p$ entrefers. En admettant cette hypothèse on commet une erreur qui est maximale lorsqu'un axe polaire est dans l'axe du décentrement.

Pour apprécier la valeur maximale de l'erreur, on a calculé l'écart relatif δ , quotient du demi-écart maximum $\frac{1}{2}(\epsilon_N - \epsilon_S)$ par la valeur moyenne $\frac{1}{2}(\epsilon_N + \epsilon_S)$, en fonction du décentrement relatif x et pour diverses valeurs de $2p$. La figure II-2 donne les variations de $\delta\%$ pour x variant de 0 à 1 et pour $2p = 4, 6, 8$ et 12 pôles.

Comme cela est prévisible, toutes ces courbes partent de $\delta\% = 0$ pour $x = 0$ et atteignent $\delta\% = 100\%$ pour $x = 1$. Ces courbes montrent que l'hypothèse de la constance de la force magnétomotrice appliquée à chaque entrefer, complètement fautive pour une machine bipolaire, est d'autant plus acceptable que le nombre de pôles est plus grand et la valeur relative du décentrement plus réduite.

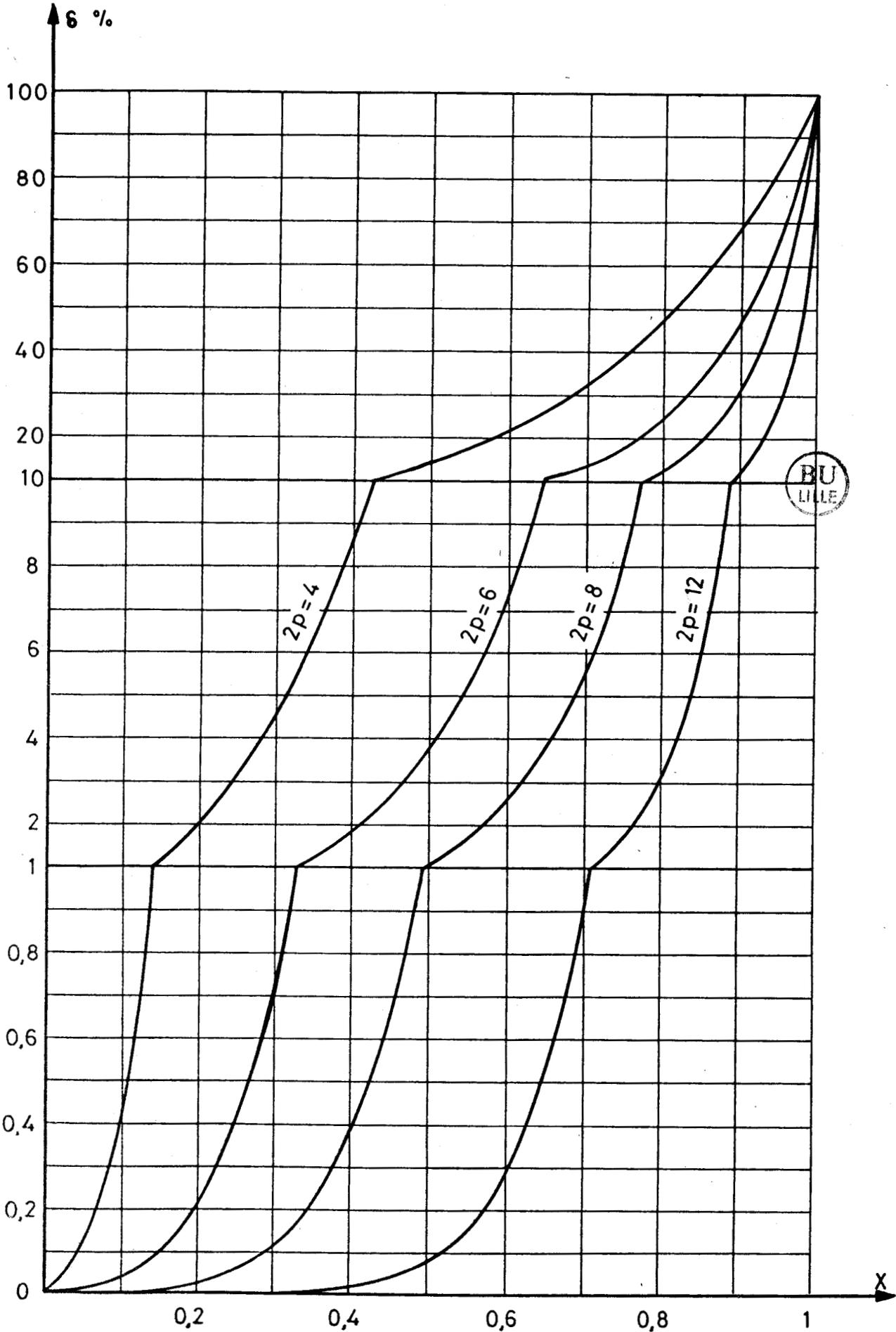


Figure II-2

Supposer la constance de la force magnétomotrice appliquée à chaque entrefer conduit à écrire

$$B.e = B_0.e_0 \quad (\text{II-3})$$

où B est l'induction en un point de l'entrefer où l'épaisseur de celui-ci est e quand il y a décentrement, et B_0 et e_0 les valeurs correspondantes quand il n'y a pas décentrement.

I.3. Force d'attraction radiale

I.3.1. Cas d'une répartition de l'induction en créneaux rectangulaires

L'origine des temps est l'instant où l'axe d'un pôle Sud coïncide avec la direction $O_R X$ du décentrement (figure II-1), celle-ci étant prise comme origine des angles. La position angulaire de l'axe de ce pôle Sud numéroté "1" est donc

$$\alpha(t,1) = \Omega t$$

Si les pôles sont numérotés dans le sens inverse de la rotation, la position du pôle "i" est donnée par

$$\alpha(t,i) = \Omega t - (i-1) \pi/p$$

En l'absence de décentrement, l'induction dans l'entrefer est formée de $2p$ créneaux rectangulaires d'amplitude $\pm B_0$ et de largeur $\beta \pi D/2p$, β étant le rapport de l'arc polaire à la distance polaire.

Lorsque le décentrement n'est plus nul, l'induction au niveau de l'axe du pôle "i" devient

$$B(t,i) = (-1)^i \frac{B_0}{1 - x \cos \alpha(t,i)} \quad (\text{II-4})$$

a) Si le nombre de pôles était infini, dans l'angle élémentaire $d\alpha$, les pièces polaires occuperaient une surface

$$dS = \beta L \frac{D}{2} d\alpha$$

La force s'exerçant sur l'élément de surface dS serait

$$df = \frac{\beta}{2} LD \frac{B_0^2}{2\mu_0} \frac{d\alpha}{(1 - x \cos \alpha)^2}$$

où μ_0 représente la perméabilité de l'air.

En intégrant $df \cdot \cos \alpha$ et $df \cdot \sin \alpha$ de 0 à π on calcule les composantes F_X et F_Y suivant les axes $O_R X$ et $O_R Y$ de la force totale F . On obtient :

$$F_Y = 0 \quad ; \quad F = F_X = \beta \pi D L \frac{B_o^2}{2\mu_o} \frac{x}{(1-x^2)^{3/2}} \quad (\text{II-5})$$

C'est, au terme $(1-x^2)^{3/2}$ près, l'expression usuelle de l'attraction résultante. Ce terme correctif n'intervient de façon sensible que lorsque x est nettement différent de zéro.

La somme C des forces d'attraction rotor-stator en l'absence de décentrement, somme effectuée sans tenir compte de la direction de ces forces, est donnée par la relation :

$$C = \beta \pi D L \frac{B_o^2}{2\mu_o} \quad (\text{II-6})$$

Les relations (II-5) et (II-6) donnent alors

$$F = F_X = C \frac{x}{(1-x^2)^{3/2}} \quad (\text{II-5}')$$

b) Pour tenir compte du nombre fini de pôles, on peut dans un premier temps, supposer que sous chaque pôle l'induction est la même que dans l'axe de celui-ci. Par exemple, pour $2p = 6$ et $x = 0,3$, cela correspond à l'onde d'induction représentée à la figure II-3-a.

La force s'exerçant sur le pôle "i" a pour composantes

$$f_X(t,i) = \frac{L D B_o^2 \cos \alpha(t,i)}{2\mu_o [1-x \cos \alpha(t,i)]^2} \sin \frac{\beta \pi}{2p}$$

$$f_Y(t,i) = \frac{L D B_o^2 \sin \alpha(t,i)}{2\mu_o [1-x \cos \alpha(t,i)]^2} \sin \frac{\beta \pi}{2p}$$

La force totale F sollicitant l'arbre de la machine a pour composantes, à un instant t donné,

$$F_X(t) = \sum_{i=1}^{2p} f_X(t,i) \quad ; \quad F_Y(t) = \sum_{i=1}^{2p} f_Y(t,i).$$

La force ainsi calculée montre que la relation (II-4), donnant l'induction à un instant t donné dans l'axe du pôle "i", ne donne une valeur acceptable que si le nombre de pôles $2p$ est suffisamment grand et au moins égal à 8.

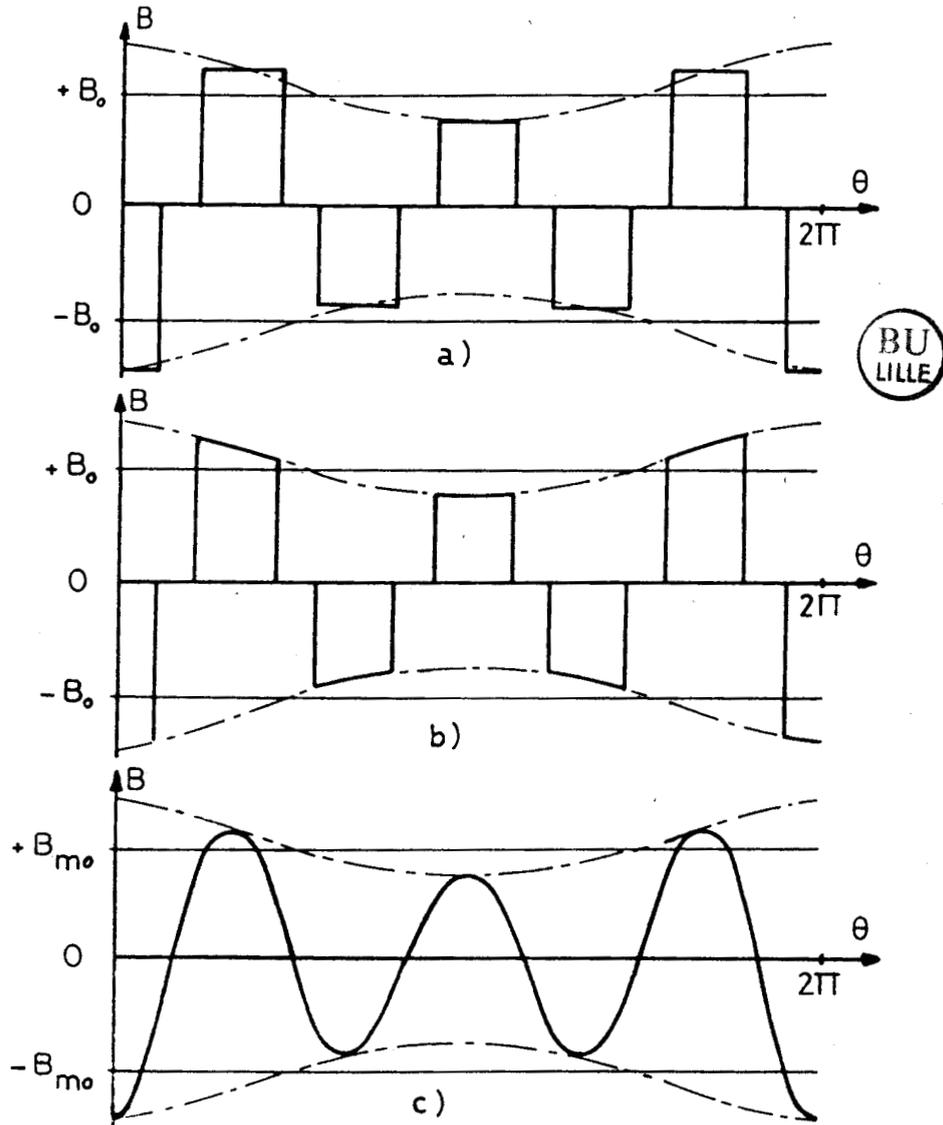


Figure II-3 ($2p = 6$, $x = 0,3$)

c) La variation de l'épaisseur de l'entrefer sous un même pôle du fait du décentrement peut être prise en compte. L'induction en un point distant d'un angle τ de l'axe du pôle "i" est alors :

$$(-1)^i \frac{B_0}{1 - x \cos [\alpha(t,i) + \tau]}$$

Toujours pour $2p = 6$ et $x = 0,3$, l'onde d'induction correspondante est schématisée à la figure II-3.b.

En calculant la force d'attraction résultante à partir de cette expression de l'induction, le résultat est plus proche de la valeur calculée en supposant le nombre de pôles infini.

I.3.2. Cas d'une répartition sinusoïdale de l'induction

En l'absence de décentrement, l'induction le long de l'entrefer créée par un inducteur "parfait" est :

$$B(t, \theta) = -B_{mo} \cos p (\theta - \Omega t) ,$$

B_{mo} étant l'induction dans l'axe d'un pôle et θ l'angle que fait un point de l'entrefer avec l'axe $O_R X$.

L'induction sous le pôle "i" en un point distant de τ de son axe est donnée par la relation

$$B(i, \tau) = (-1)^i B_{mo} \cos p \tau .$$

Le décentrement est maintenant rapporté à l'épaisseur de l'entrefer e_{omin} dans l'axe des pôles lorsque le rotor est parfaitement centré, donc :

$$x = \frac{\Delta e}{e_{omin}} \quad (II-7)$$

et l'attraction magnétique résultante est rapportée à la somme algébrique C de toutes les attractions élémentaires en l'absence de décentrement. La valeur de C est ici donnée par la relation :

$$C = \frac{1}{2} \pi D L \frac{B_{mo}^2}{2\mu_o} \quad (II-8)$$

a) L'application directe de la relation (II-3), puisque l'épaisseur de l'entrefer en un point caractérisé par θ est :

$$e(t, \theta) = e_o(t, \theta) - x e_{omin} \cos \theta ,$$

donne comme expression de l'induction

$$B(t, \theta) = \frac{-B_{mo} \cos p (\theta - \Omega t)}{1 - x \cos \theta |\cos p (\theta - \Omega t)|} \quad (II-9)$$

Comme le montre la figure II-3.c, à un instant donné, la répartition de l'induction le long de l'entrefer n'est plus sinusoïdale. De plus, face à un point fixe du stator, la variation de l'induction en fonction du temps n'est pas non plus sinusoïdale, ce qui est très gênant pour les calculs ultérieurs.

En calculant les composantes de l'attraction sur un élément de surface à partir de la relation (II-9), en intégrant pour un pôle, puis en sommant pour les $2p$ pôles, on obtient les composantes $F_X(t)$ et $F_Y(t)$ de la force d'attraction.

Comme dans le cas de la répartition de l'induction en créneaux rectangulaires, la composante F_X oscille un peu de part et d'autre de sa valeur moyenne, et la composante F_Y oscille de part et d'autre de zéro. Mais, dès que le nombre de pôles est suffisant, surtout si le décentrement relatif est faible, F_Y est nul et F_X indépendant du temps. On a dans ce cas

$$F = F_X = C \frac{0,85 x}{(1 - 0,82 x^2)^{3/2}} \quad (\text{II-10})$$

b) Pour faciliter les calculs ultérieurs, on suppose que l'induction face à chaque point fixe du stator est une fonction sinusoïdale du temps. Pour cela, on prend comme expression de l'induction :

$$B(t, \theta) = \frac{-B_{mo} \cos p(\theta - \Omega t)}{1 - x \cos \theta} \quad (\text{II-11})$$

ce qui permettra de supposer sinusoïdales les forces électromotrices induites dans les conducteurs statoriques.

Le calcul de la force d'attraction radiale résultante, mené à partir de cette expression de l'induction, et pour les grandes valeurs du nombre de pôles, conduit à une relation identique à celle donnée en (II-5), et donc à une force d'attraction nettement surestimée.

La figure II-4 donne les variations de F/C en fonction de x pour les machines dont le nombre de pôles est au moins égal à 8. La courbe en trait continu correspond à la relation (II-5') et celle en trait interrompu à la relation (II-10). Le tracé de $F/C = x$ et $0,85x$ montre qu'on ne peut simplifier ces relations que pour les faibles valeurs du décentrement relatif.

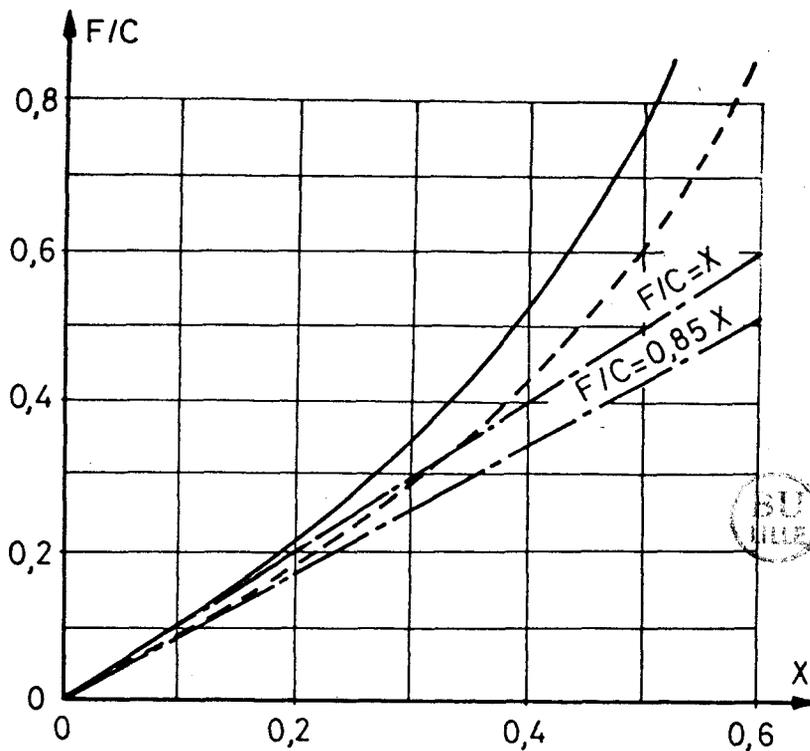


Figure II-4

II- INFLUENCE DU DECENTREMENT SUR LES FORCES ELECTROMOTRICES

L'expression simplifiée (II-11) de l'induction conduit à des forces électromotrices induites dans les conducteurs statoriques de forme d'onde sinusoïdale, mais leur amplitude dépend de la position de ces conducteurs.

Les forces électromotrices induites dans les divers enroulements d'une même phase auront des amplitudes différentes.

De plus, ces forces électromotrices présentent des écarts de phase, car si les divers enroulements sont régulièrement décalés par rapport à l'axe du stator passant par O_S , il en est autrement par rapport à l'axe du rotor passant par O_R .

II.1. Positions géométriques des enroulements statoriques

S. BEN CHAABANE et A. BAHRI ont considéré le cas simple d'un bobinage triphasé à $2p$ pôles réalisé en une seule couche de sections à pas diamétral. Par phase et par paire de pôles, il est formé de m sections

comptant chacune n spires : cela constitue ce qui est appelé par la suite un enroulement. La figure II-5 représente les deux premiers des p enroulements de la phase 1.

Si l'axe de l'enroulement 1 de la phase 1 fait un angle γ_S avec l'axe $O_S X$, celui de l'enroulement k de la phase q fait avec cet axe un angle

$$\theta_S(q,k) = \gamma_S + (3k + q - 4) \frac{2\pi}{3p} \quad (\text{II-12})$$

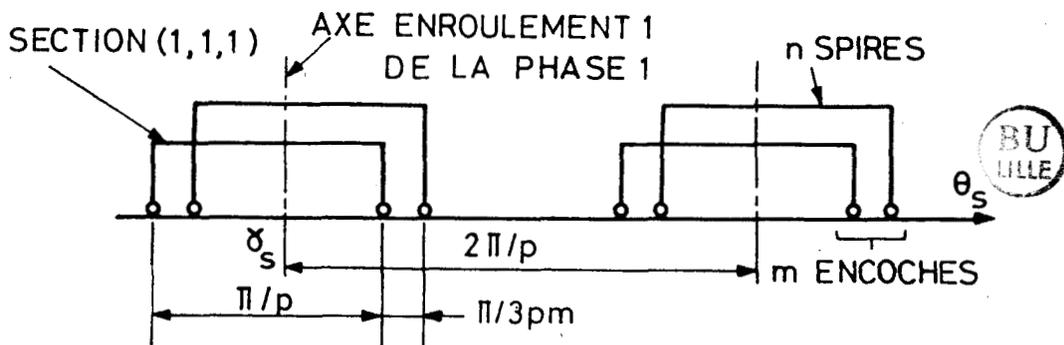


Figure II-5

Les encoches occupées par les faisceaux aller et retour d'une section j de l'enroulement k de la phase q ont pour positions angulaires respectives

$$\theta_S(q,k,j) = \theta_S(q,k) + (-4m + 2j - 1) \frac{\pi}{6pm} \quad (\text{II-13})$$

$$\theta'_S(q,k,j) = \theta_S(q,k) + (2m + 2j - 1) \frac{\pi}{6pm}$$

Pour étudier toutes les positions du bobinage par rapport au décentrement, dont la direction peut être quelconque, il faut faire varier γ_S de 0 à $2\pi/3p$. Au delà de cette valeur, il suffit de permuter les numéros des phases pour retrouver une configuration déjà étudiée.

Un point M (figure II-1) qui fait un angle θ avec l'axe $O_R X$, détermine avec l'axe $O_S X$, l'angle θ_S . Les angles θ et θ_S sont liés par la relation :

$$\theta = \arccos \frac{\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - 2D \Delta e \cos \theta_S + 4 \Delta e^2}}{2 \Delta e}$$

$$\text{En posant } y = D/e_{\text{omin}} \quad (\text{II-14})$$

et en utilisant la relation (II-7) on a aussi

$$\theta = \text{arc cos} \frac{y - \sqrt{y^2 - 8xy \cos \theta_S + 16x^2}}{4x} \quad (\text{II-15})$$

A valeur de θ_S donnée, cette relation conduirait à deux valeurs possibles de θ . Aussi est-il nécessaire de compléter par

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_S} \geq 0 \quad (\text{II-16})$$



II.2. Forces électromotrices induites dans les sections

Compte tenu de l'expression (II-11) retenue pour l'induction, la force électromotrice induite dans la section j de l'enroulement k de la phase q a pour valeur instantanée

$$e(q,k,j) = nB_{\text{mo}} L \Omega \frac{D}{2} \left\{ \frac{\text{cosp}[\theta(q,k,j) - \Omega t]}{1 - x \cos \theta(q,k,j)} - \frac{\text{cosp}[\theta'(q,k,j) - \Omega t]}{1 - x \cos \theta'(q,k,j)} \right\} \quad (\text{II-17})$$

$\theta(q,k,j)$ et $\theta'(q,k,j)$ sont les angles que la relation (II-15) fait correspondre à $\theta_S(q,k,j)$ et $\theta'_S(q,k,j)$ tels que $\theta_S(q,k,j) = \gamma_S - \frac{\pi}{2p}$ et $\theta'_S(q,k,j) = \gamma_S + \frac{\pi}{2p}$, γ_S désigne ici l'angle que fait l'axe d'une section avec l'axe du décentrement.

On peut mettre cette force électromotrice sous la forme

$$e(q,k,j) = nB_{\text{mo}} L \Omega \frac{D}{2} U(q,k,j) \sin [p\Omega t + \eta(q,k,j)] \quad (\text{II-17}')$$

avec

$$U(q,k,j) = \sqrt{\frac{1}{A^2(q,k,j)} + \frac{1}{R^2(q,k,j)} - 2 \frac{\text{cosp}[\theta'(q,k,j) - \theta(q,k,j)]}{A(q,k,j) R(q,k,j)}} \quad ,$$

$$\eta = \text{arc sin} \frac{1}{U(q,k,j)} \left[\frac{\text{cosp} \theta(q,k,j)}{A(q,k,j)} - \frac{\text{cosp} \theta'(q,k,j)}{R(q,k,j)} \right] \quad ,$$

$$\eta = \text{arc cos} \frac{1}{U(q,k,j)} \left[\frac{\text{sinp} \theta(q,k,j)}{A(q,k,j)} - \frac{\text{sinp} \theta'(q,k,j)}{R(q,k,j)} \right] \quad ,$$

$$A(q,k,j) = 1 - x \cos \theta(q,k,j) \text{ et } R(q,k,j) = 1 - x \cos \theta'(q,k,j) \quad .$$

a) L'amplitude U , rapportée à sa valeur $U_0=2$ en l'absence de décentrement, varie en fonction de celui-ci suivant des courbes telles celles de la figure II-6 tracées pour $2p=24$. L'angle γ'_S est celui que la relation (II-5) fait correspondre à γ_S . Ce faisceau de courbes est d'autant plus divergent que $2p$ est plus grand. Par contre, il est pratiquement indépendant de y quand on donne à ce rapport des valeurs usuelles (supérieures ou égales à 100 par exemple).

On vérifie

. que U/U_0 est supérieur à l'unité pour les sections dont les axes sont situés dans la zone d'entrefer réduit et correspondant à $-\frac{\pi}{2} < \gamma'_S < \frac{\pi}{2}$,

. que ce rapport est inférieur à l'unité pour les sections situées dans la zone à entrefer accru : $\frac{\pi}{2} < \gamma'_S < \frac{3\pi}{2}$,

. que le maximum est obtenu pour $\gamma'_S = 0$ et le minimum pour $\gamma'_S = \pi$.

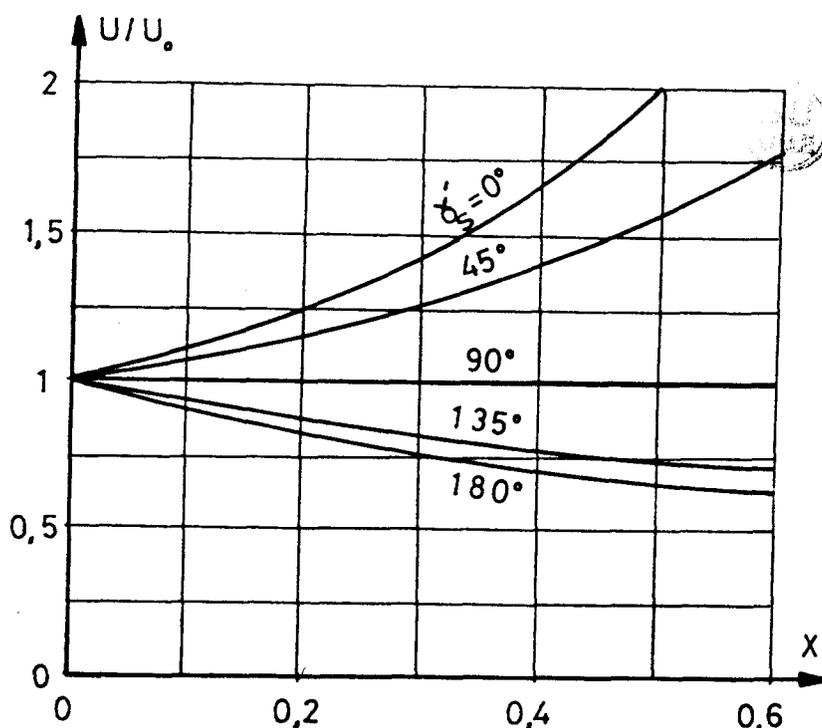


Figure II-6

b) L'écart de phase $\eta - \eta_0$, avec $\eta_0(q,k,j) = \frac{\pi}{2} - p\theta_S(q,k,j)$, exprime le déphasage de la force électromotrice induite dans une section en avant de celle qui y serait induite si le décentrement était nul.

Cet écart est nul pour les sections ayant leur axe en $\gamma'_S=0$ ou π négatif pour $0 < \gamma'_S < \pi$ et positif pour $\pi < \gamma'_S < 2\pi$.

Cet écart croît avec x , avec y et avec le nombre de pôles $2p$. Pour les valeurs usuelles de y , l'écart de phase crée des différences entre les forces électromotrices induites dans les sections d'une même phase nettement inférieures aux différences dues aux écarts d'amplitudes.

II-3 Forces électromotrices induites dans les enroulements.

Un enroulement statorique est formé par la mise en série de m sections voisines. La force électromotrice induite dans l'enroulement k de la phase q est donc donnée par :

$$e(q,k) = \sum_{j=1}^m e(q,k,j) \quad (\text{II-18})$$

On peut mettre cette force électromotrice sous la forme

$$e(q,k) = n B_{m0} L \Omega \frac{D}{2} V(q,k) \sin [p\Omega t + \psi(q,k)] \quad (\text{II-18}')$$

avec

$$V(q,k) = \sqrt{\left[\sum_{j=1}^m U(q,k,j) \cos n(q,k,j) \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^m U(q,k,j) \sin n(q,k,j) \right]^2},$$

$$\psi(q,k) = \arcsin \left[\frac{1}{V(q,k)} \sum_{j=1}^m U(q,k,j) \sin n(q,k,j) \right],$$

$$\psi(q,k) = \arccos \left[\frac{1}{V(q,k)} \sum_{j=1}^m U(q,k,j) \cos n(q,k,j) \right].$$

a) L'amplitude V de la force électromotrice $e(q,k)$, rapportée à la valeur V_0 qu'elle aurait en l'absence de décentrement, varie en fonction de x comme le rapport U/U_0 . En effet, V/V_0 est pratiquement indépendant du nombre m d'encoches par pôle et par phase ainsi que du rapport y .

On montre que

$$V_0 = 2m K_1$$

où

$$K_1 = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{m \sin \frac{\pi}{6m}}$$

est le coefficient du bobinage.

b) Le déphasage entre la force électromotrice induite dans un enroulement et celle qui y serait induite si x était nul, varie de la même façon que pour une section prise individuellement. Cependant, sa valeur diminue quand m augmente, et cela d'une façon d'autant plus nette que le nombre de pôles est plus petit.

On montre que

$$\psi_0(q,k) = \frac{\pi}{2} - p\theta_S(q,k,1) - (m-1) \frac{\pi}{6m}$$

c) La figure II-7 montre, par exemple pour $2p=24$, $x=0,5$, $y=200$ et $m=1$, les 12 vecteurs représentatifs $\vec{0.1}, \vec{0.2}, \dots, \vec{0.12}$ des forces électromotrices induites dans les 12 enroulements d'une phase. Les amplitudes varient de 1,983 à 0,668 V_0 et les écarts de phase de $+3^\circ,4$ à $-3^\circ,4$.

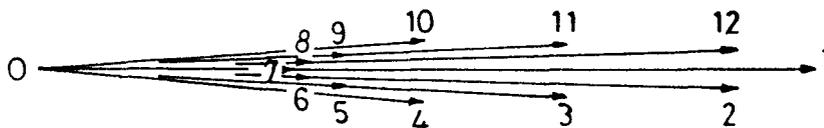


Figure II-7

Cette étude des forces électromotrices induites dans les enroulements nous permet de constater que

- . le décentrement fait apparaître des différences importantes entre les forces électromotrices induites dans les divers enroulements d'une même phase. Ces différences sont susceptibles de donner lieu à des courants de circulation importants si on groupe ces enroulements en parallèle,

- . ces différences sont essentiellement dues aux écarts d'amplitude,

- . Si on néglige les écarts de phase, on peut confondre les angles θ et θ_S et supposer m égal à 1.

II.4. Forces électromotrices induites dans les phases

Si on met en série tous les enroulements de la même phase, la force électromotrice totale est donnée par la relation

$$e(q) = \sum_{k=1}^p e(q,k) \quad (\text{II-19})$$

Avec les hypothèses simplificatrices du paragraphe précédent, on peut admettre que :

. les forces électromotrices $e(q,k)$ des p enroulements de la même phase sont en phase ; il en est donc de même pour la force électromotrice totale $e(q)$.

. les forces électromotrices induites dans les enroulements des phases 2 et 3, décalés de $2\pi/3p$, et $4\pi/3p$ par rapport à ceux de la phase 1, sont déphasées de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport à celles de la phase 1 ; il en est de même des forces électromotrices totales.

. Les forces électromotrices induites dans les phases sont déphasées deux à deux de $2\pi/3$. L'écart entre leurs amplitudes est négligeable. Elles forment donc un système triphasé équilibré direct.

Les forces électromotrices par phase ont une amplitude $E(q)$ qu'on rapporte à la valeur $E_o(q)$ qu'elles auraient en l'absence de décentrement. Pour les valeurs de p suffisantes, $E(q)/E_o(q)$ est donné avec une bonne approximation par la relation

$$\frac{E(q)}{E_o(q)} = \frac{1 - \frac{1}{2} x^2}{1 - x^2 + \frac{1}{8} x^4}$$

III- REDUCTION DE L'ATTRACTION RADIALE

S. BEN CHAABANE et A. BAHRI ont tout d'abord présenté les différents couplages possibles des enroulements constituant chaque phase.

Pour déterminer la réduction de l'attraction radiale, ils ont tout d'abord suivi la voie logique qui consiste à évaluer successivement les forces électromotrices de circulation, les courants de circulation, l'induction dans l'entrefer due à ces courants, l'induction résultante due à l'inducteur et à l'induit, la force d'attraction radiale. La comparaison des forces d'attraction radiale, que l'on a sans couplage des enroulements puis avec couplage de ceux-ci, permet d'apprécier la réduction obtenue. Le point délicat de cette méthode est le passage des forces électromotrices de circulation aux courants de circulation. Malgré une étude soignée des forces magnétomotrices dues aux courants de circulation, il est difficile d'apprécier la nature des réactances qui limitent ces courants.

Aussi ont-ils proposé une autre méthode, qui n'est pas non plus sans inconvénient, et qui consiste à apprécier directement la force électromotrice résultante d'un enroulement due à l'inducteur et aux courants de circulation, d'en déduire l'induction résultante correspondante et de calculer la force d'attraction radiale.

III.1. Couplages en parallèle des enroulements

Avec un nombre donné de p paires de pôles, on peut envisager plusieurs types de couplage en parallèle des p enroulements de chaque phase.

III.1.1. Cas général ; couplage avec a voies en parallèle

Avec p enroulements, on peut réaliser a voies en parallèle à condition que p/a soit entier.

Pour que les connexions soient courtes, en forme, comme le montre la figure II-8, chaque voie avec les enroulements voisins.

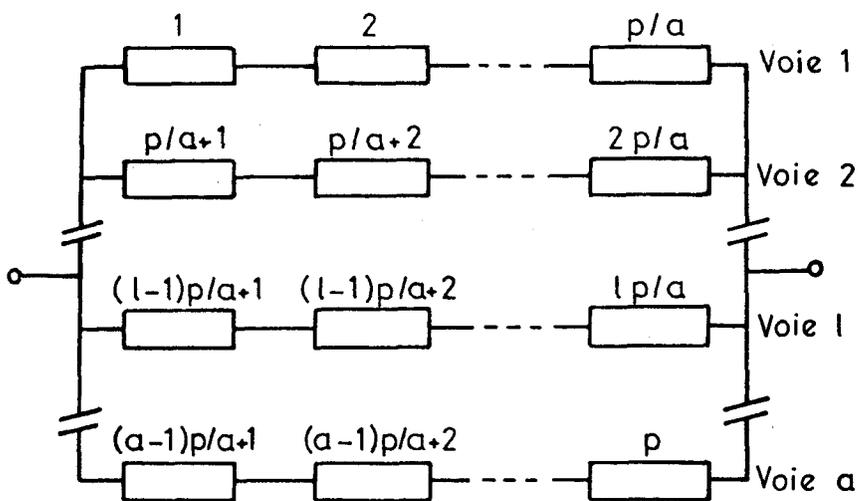


Figure II-8

Mais pour que les effets de la mise en parallèle soient aussi indépendants que possible de la direction du décentrement qui peut être quelconque, il faut que l'ensemble formé par les $3a$ voies en parallèle des trois phases soit réparti aussi uniformément que possible le long de l'induit.

Par exemple, pour une machine à 8 paires de pôles ($p=8$) et à 2 voies en parallèle par phase ($a=2$), la réalisation du couplage tel qu'il est schématisé sur la figure II-9-a est excellent. En effet, la réalisation de 2 voies en parallèle par phase équivaut à la réalisation d'une bobine ayant les enroulements d'une voie (1,2,3 et 4 pour la phase 1) d'un côté, ceux de l'autre voie (5,6,7 et 8 pour la phase 1) de l'autre côté. Les axes des trois circuits des courants de circulation sont décalés de $2\pi/3p + 2\pi/p$, soit ici de 60° . Ces trois circuits sont régulièrement répartis (figure II-9-b).

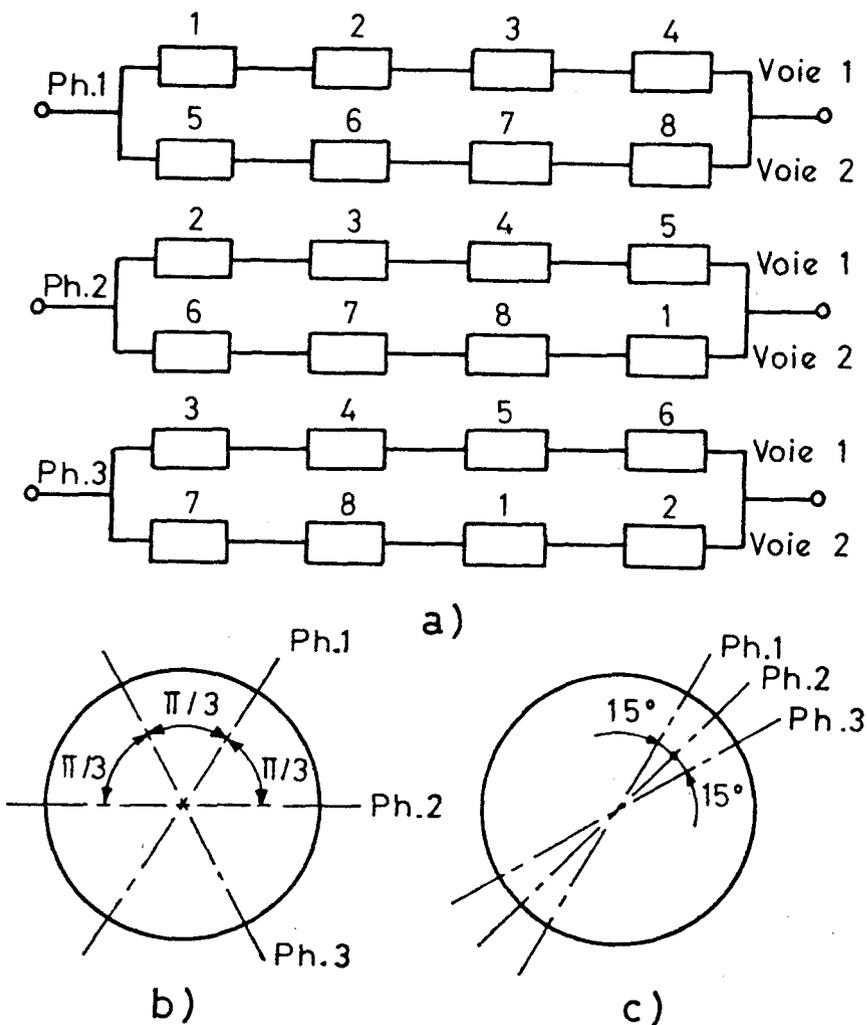


Figure II-9

Au contraire, si on avait couplé les 3 phases en mettant 3 fois les mêmes enroulements dans les mêmes voies (1,2,3,4 et 5,6,7,8), les bobines équivalentes auraient eu leurs axes décalés de $2\pi/3p$, soit ici 15° (figure II-9-c). Les effets du couplage en parallèle auraient été très tributaires de la direction du décentrement par rapport à ces bobines équivalentes d'axes voisins.

D'une façon générale, si on repère par k_2 et k_3 le premier enroulement de la première voie respectivement pour les phases 1, 2 et 3, pour que la répartition soit optimale il faut que :

$$k_2 = \frac{(2p \text{ ou } p) + 4}{6}$$

$$k_3 = 2k_2 - 1 = \frac{(2p \text{ ou } p) + 1}{3} \quad (\text{II-20})$$

L'examen des divers cas montre qu'il est toujours possible d'obtenir une répartition régulière des circuits des courants de circulation à la condition que le quotient p/a soit entier et non multiple de 3.

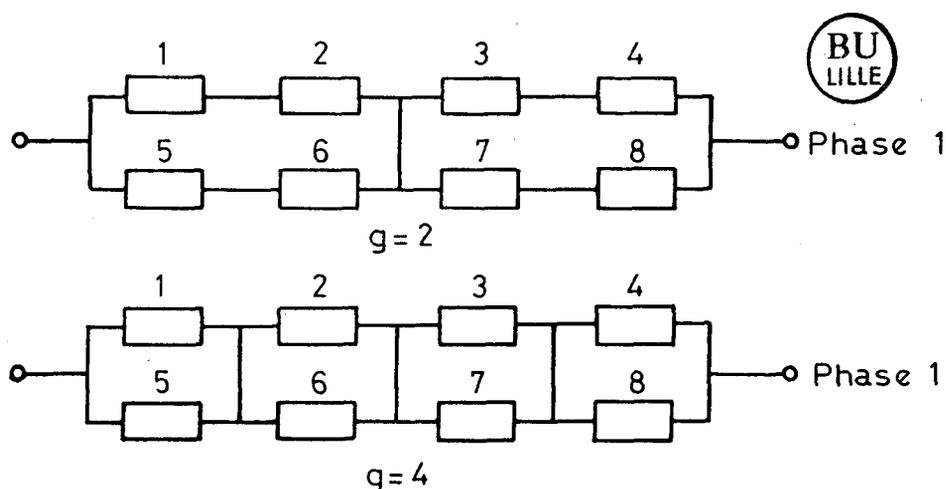
III.1.2. Multiplication du nombre de circuits du courant de circulation

Pour beaucoup de valeurs de p , il existe plusieurs valeurs de a rendant entier le rapport p/a . A p donné, il existe donc plusieurs valeurs de a , comprises entre 2 et p , possibles.

Plus a augmente, plus les effets des courants de circulation sont à priori importants.

Mais à a donné, on peut augmenter ces effets en formant chacune des phases de g groupes identiques. Pour cela il faut que p/ag soit entier.

Sur la figure II-9-a, g est égal à 1. Sur la figure II-10, on a, pour les mêmes valeurs de p et de a , représenté la phase 1 avec g égal à 2 puis 4.



III.2. Réduction de l'attraction radiale

III.2.1. Première méthode

Bien que cette première méthode n'ait pas abouti, nous avons pensé qu'il était intéressant de résumer brièvement ce qui y avait été fait. En effet notre expérimentation a entr'autre pour objet, d'essayer d'expliquer ce qui n'a pas permis l'aboutissement de cette méthode.

III.2.1.1. Force magnétomotrice créée par les courants de circulation

Pour passer des forces électromotrices de circulation aux courants de circulation, il faut évaluer la réactance correspondant à ce système de courants. Pour cela, il faut connaître les caractéristiques de la force magnétomotrice que créent ces courants.

Les courants de circulation forment des systèmes déséquilibrés et leurs valeurs dépendent de p , de a et de la position par rapport au décentrement des divers enroulements. S. BEN CHAABANE et A. BAHRI ont tout d'abord évalué la force magnétomotrice due à un seul enroulement avant d'ajouter, en chaque point de la périphérie de l'induit, les $3p$ forces magnétomotrices créées par les $3p$ enroulements. Après avoir considéré le cas d'une machine où $p=2$ et $a=2$, ils ont généralisé.

Dans le cas d'une machine à $2p$ pôles, on peut décomposer les $3p$ forces électromotrices de circulation en p systèmes équilibrés directs, p systèmes équilibrés inverses et p systèmes homopolaires.

Les courants dus à chacun de ces systèmes passant dans les trois enroulements correspondants donnent toujours des forces magnétomotrices elliptiques ou pulsantes décomposables en forces magnétomotrices circulaires de vitesse $+\omega/h$ ou $-\omega/h$, h étant impair et différent de p et de ses multiples.

Aucune de ces forces magnétomotrices ne tourne à la même vitesse que le rotor.

La première conséquence est que les courants de circulation induits par l'inducteur dans les enroulements statoriques ne donnent pas lieu à la création d'un couple moyen.

La seconde conséquence est qu'il est difficile de faire le passage des diverses composantes des forces électromotrices de circulation à celles des courants. Néanmoins, on peut penser que, avec une bonne

approximation, on peut effectuer ce passage à l'aide d'une réactance unique X_C , dont la valeur est du même ordre de grandeur que la réactance inverse correspondant à une force magnétomotrice balayant le rotor à la vitesse 2Ω .

III.2.1.2. Les forces électromotrices de circulation

Pour une voie d'enroulements, on désigne par force électromotrice de circulation la différence entre la force électromotrice qui y est induite et la tension à ses bornes. Cette tension est égale à la somme des forces électromotrices induites dans les p enroulements divisée par le nombre a de voies;

C'est cette force électromotrice de circulation, née du couplage en parallèle, qui est à l'origine du courant de circulation. Elle peut être positive ou négative, suivant la position de la voie considérée par rapport à la direction du décentrement.

Puisqu'on peut supposer en phase les forces électromotrices induites dans les divers enroulements d'une même phase, on peut utiliser les valeurs efficaces.

La valeur efficace de la force électromotrice de circulation pour la voie l de la phase q est donnée par la relation

$$E_{cl}(q) = E_l(q) - E_r(q), \quad (\text{II-21})$$

$E_r(q)$ étant la force électromotrice résultante de la phase q

$$E_r(q) = \frac{1}{a} \sum_{k=1}^p E(q,k), \quad (\text{II-22})$$

et $E_l(q)$ la force électromotrice totale induite dans la voie l

$$E_l(q) = \sum_{k=k_q}^{k_q + l \frac{p}{a} - 1} E(q,k) \quad (\text{II-23})$$

k_q désigne le numéro du premier enroulement de la voie 1 de la phase q .

II.2.2. Deuxième méthode

Etant donnée la complexité d'une bonne prise en compte de la force magnétomotrice créée dans l'entrefer par les courants de circulation, il s'est révélé préférable de passer des forces électromotrices résultantes à l'induction résultante.

III.2.2.1. Procédé utilisé

On considère un enroulement (q,k) quelconque dont on néglige la résistance.

S'il est en circuit ouvert, la tension à ses bornes est égale à la force électromotrice qui y est induite par le flux extérieur ϕ_{ext} , seul existant alors,

$$e(q,k) = [e(q,k)]_{\phi_{ext}}$$

Par contre, s'il est traversé par un courant, il crée un flux propre ϕ_{pr} , et la tension à ses bornes est la force électromotrice $e_r(q,k)$ due au flux résultant de l'addition des effets des flux ϕ_{ext} et ϕ_{pr} ,

$$e_r(q,k) = [e(q,k)]_{\phi_{ext}} + [e(q,k)]_{\phi_{pr}}$$

La force électromotrice due au seul flux extérieur $e(q,k)$ est celle créée dans cet enroulement par le seul inducteur. Elle correspond à l'induction $B(t,\theta)$.

Lorsqu'on met des enroulements en parallèle, la variation de la force électromotrice vient des courants de circulation qui modifient le flux. La force électromotrice résultante $e_r(q,k)$ correspond à l'induction résultante $B_r(t,\theta)$. On a donc :

$$B_r(t,\theta) = B(t,\theta) \frac{e_r(q,k)}{e(q,k)} \quad (II-24)$$

Ce procédé présente deux inconvénients :

. La relation (II-24) ne permet d'obtenir les amplitudes de l'induction résultante dans l'entrefer, à partir des forces électromotrices induites dans les enroulements, que face aux axes de ces enroulements, c'est-à-dire en $3p$ points de l'entrefer. Le paragraphe suivant montre que suivant le couplage, ces $3p$ points peuvent appartenir à une ou plusieurs courbes enveloppes, lieu des maxima.

. La variation de l'induction dans l'entrefer, due aux courants de circulation, est surestimée puisqu'on ne tient pas compte des inductances de fuites. Les courants de circulation créent un flux de réaction proprement dit traversant l'entrefer et un flux de fuites d'encoches et de têtes de bobines. X_c étant la réactance totale, si l'on désigne par X_{cf} la réactance de fuites, il faut introduire un coefficient de réduction R tel que

$$R = \frac{X_c - X_{cf}}{X_c} \quad (\text{II-25})$$

Par la suite, la réduction de la force radiale a été calculée en supposant $R=1$. Il faudra donc multiplier par R les résultats obtenus.

III.2.2.2. Courbes-enveloppes

Les $3p$ points donnant la courbe enveloppe (Nord ou Sud) limitant l'onde d'induction résultante le long de l'entrefer se calculent par la relation :

$$B_{r\max}[\theta(q,k)] = \frac{\pm B_{m0}}{1 - x \cos \theta(q,k)} \left\{ 1 + \frac{a' [E_r(q) - E_l(q)]}{p E(q,k)} \right\} \quad (\text{II-26})$$

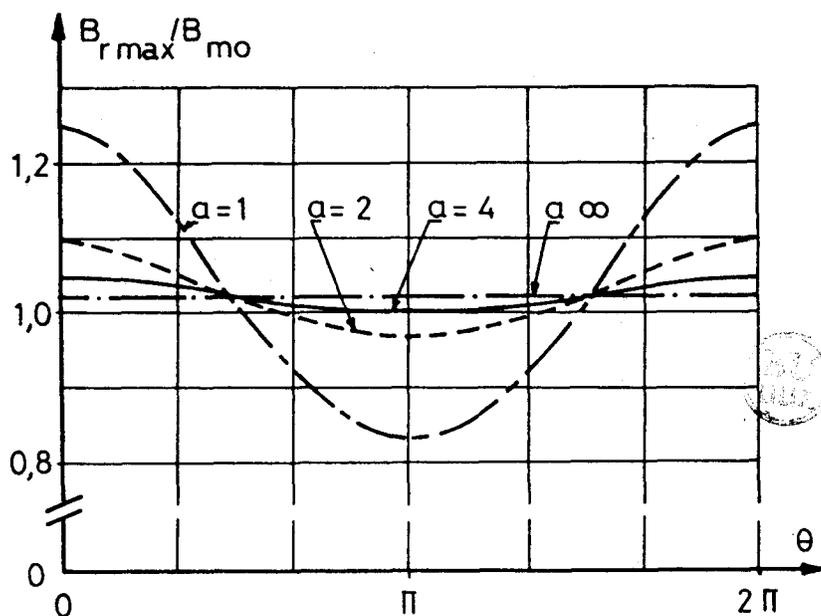
On passe ensuite à l'onde d'induction résultante en supposant qu'elle est sinusoïdale, de longueur d'onde $\pi D/p$ et modulée en amplitude suivant la courbe-enveloppe.

Pour les couplages respectant la condition de répartition régulière des $3a$ voies, les courbes-enveloppes sont indépendantes de la position du bobinage statorique par rapport à la direction du décentrement.

. Si p est égal à a , les $3p$ points, correspondant aux axes des enroulements, donnent une courbe-enveloppe unique, qui ne dépend que du décentrement relatif x et du nombre p de paires de pôles.

A x donné, la courbe-enveloppe est d'autant plus aplatie que p (et donc a) est plus grand. La figure II-11 montre l'évolution de la courbe-enveloppe quand, x étant égal à $0,2$, a augmente.



Figure II-11 : $x=0,2$

. Dans le cas général, l'induction dans l'axe d'un enroulement dépend non seulement de sa propre position sur la périphérie de l'induit mais aussi de celles des p/a autres enroulements de la même voie.

Les $3p$ valeurs de B_{rmax} , obtenues au niveau des $3p$ axes d'enroulements, appartiennent à p/a courbes-enveloppes définies chacune par $3a$ points relatifs aux enroulements occupant le même rang dans leurs voies respectives.

Comme amplitude de l'induction résultante, on peut prendre en chaque point de l'entrefer la moyenne quadratique des valeurs données en ce point par les p/a courbes-enveloppes.

On obtient aussi des courbes ayant la même allure que celles de la figure II-11, mais plus ondulées.

III.2.2.3. Force d'attraction magnétique radiale résultante

Pour le calcul des forces, on utilise le même procédé que

lorsqu'il n'y avait pas de courant de circulation. On considère que l'amplitude de l'induction résultante, sous l'axe d'un pôle, suit la courbe-enveloppe correspondant au couplage réalisé. En un point fixe de l'entrefer, on suppose que l'induction résultante varie sinusoïdalement en fonction du temps et a donc pour expression :

$$B_r(t, \theta) = -B_{rmax}(\theta) \cos(\omega t - p\theta) \quad (\text{II-27})$$

et on procède comme au paragraphe I-3-2.

La force F ainsi calculée, est comparée à celle F_1 obtenue dans les mêmes conditions en l'absence de tout courant statorique, soit

$$F_1 = C \frac{x}{(1-x^2)^{3/2}}$$

et on déduit le taux de réduction de l'attraction radiale

$$\Delta F\% = 100 \frac{F_1 - F}{F_1} \quad (\text{II-28})$$

Les valeurs de ΔF calculées ainsi pour un grand nombre de valeurs de x , de p et de a lorsque les conditions des relations (II-20) sont respectées, montrent que le taux de réduction dépend très peu de x surtout si p est grand.

On a reporté à la figure II-12 les valeurs de $\Delta F\%$ calculées pour p inférieur à 32 et relié par des courbes les points correspondant à la même valeur de a .

Ces courbes montrent que, lorsque p est grand, ΔF ne dépend plus que de a . Il est donc possible, pour les machines à grand nombre de pôles ($p \geq 8$), de tracer une courbe unique (figure II-13) donnant $\Delta F\%$ en fonction de a .

On voit que ΔF croît rapidement quand a va de 2 à 6, mais qu'au-delà de 8 voies en parallèle, l'intérêt de l'accroissement de a pour la réduction de la force radiale devient minime.

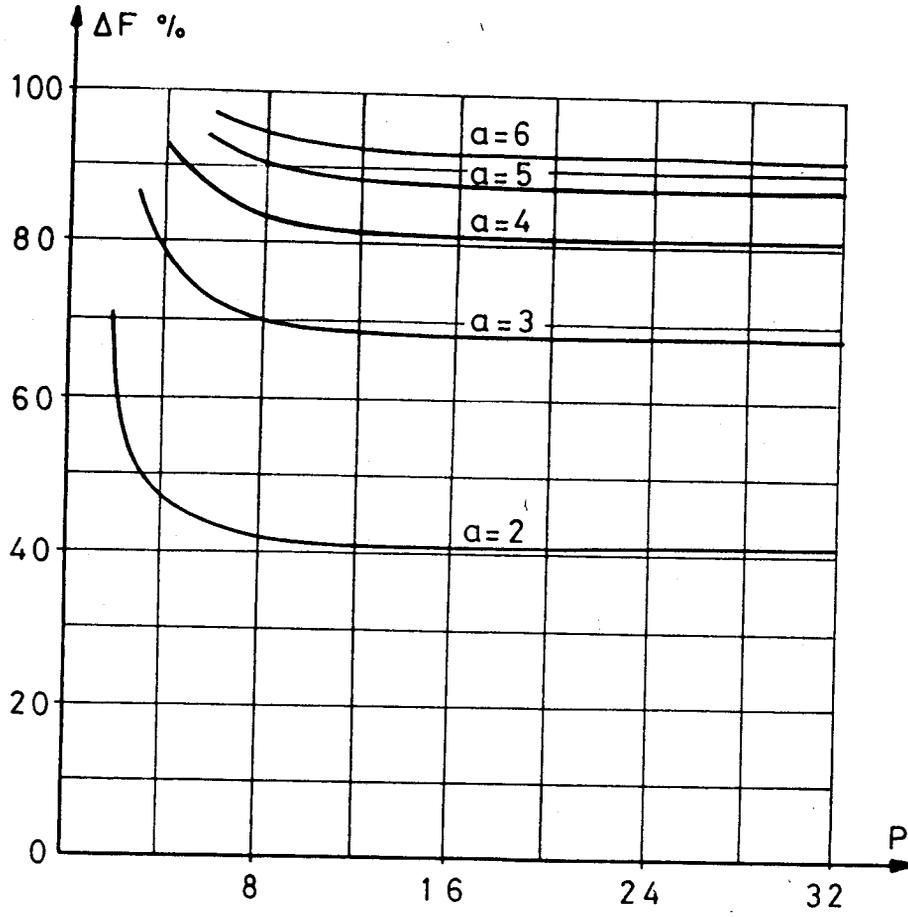


Figure II-12

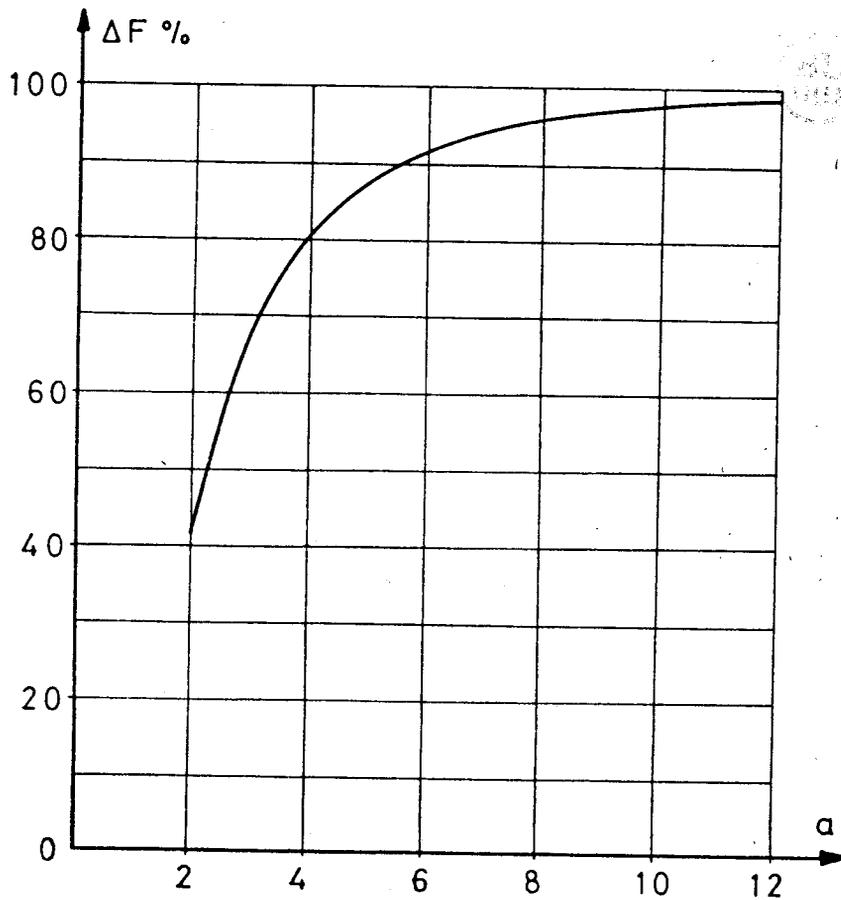


Figure II-13

Il ne faut pas oublier d'affecter les résultats obtenus du coefficient R , qui tient compte des flux de fuites des enroulements statoiriques.

C H A P I T R E 3

COMPLEMENTS A L'ETUDE THEORIQUE

L'étude théorique menée par S. BEN CHAABANE et A. BAHRI dont nous avons fait le résumé au chapitre précédent en nous appuyant en grande partie sur le rapport de fin de contrat est relative à une machine synchrone multipolaire dont l'enroulement statorique est à une couche.

La machine synchrone qui a été mise à notre disposition en vue de l'expérimentation possède $2p=8$ pôles et un bobinage statorique en sections à pas diamétral par pôle mais à 2 côtés de section par encoche ou à deux couches. Il est caractérisé par $m=3$ encoches par pôle et par phase. Le premier enroulement de la première phase fait avec l'axe de décentrement un angle $\gamma_S = -7^\circ,5$. Le diamètre de l'alésage statorique est $D=500\text{mm}$ et l'épaisseur minimale de l'entrefer est $e_{\text{omin}} = 3\text{mm}$. On peut faire varier le décentrement Δe de deux en deux dixième de mm. Cette description très sommaire n'a d'autre but que de donner les valeurs qui nous permettront de faire les applications numériques de ce chapitre que l'on pourra comparer aux résultats expérimentaux ultérieurs.

L'objet de ce chapitre est donc d'adapter les résultats théoriques du chapitre précédent à cette machine expérimentale. C'est surtout le repérage des éléments du bobinage statorique, le calcul des différentes forces électromotrices et les différentes possibilités de couplage des enroulements qui retiendront notre attention.

Pour que les résultats puissent être comparés à ceux du chapitre précédent nous adopterons les mêmes relations, les mêmes hypothèses, les mêmes simplifications dans les calculs et le même développement de ceux-ci. Dans le résumé qui suit, pour bien mettre en relief ce qu'il y a de nouveau, nous ne reproduirons que les relations qui diffèrent de celles du chapitre précédent en les affectant toutefois d'une numérotation semblable.

I- POSITIONS GEOMETRIQUES DES ENROULEMENTS STATORIQUES

Nous considérons donc ici une machine triphasée à $2p$ pôles portant un bobinage à deux couches en sections à pas "diamétral". Chaque section compte n spires. S'il y a m encoches par pôle et par phase, le bobinage d'une phase relatif à un pôle, appelé "enroulement", est formé de m sections voisines. Il y a $2p$ enroulements par phase.

Nous repérons par

q le numéro de la phase (q égal 1,2, ou 3)

k le numéro de l'enroulement (k égal 1,2,... ou $2p$),

et j le numéro de la section (j égal 1,2, ... ou m).

La figure III-1 représente, le long de l'induit développé, trois enroulements successifs appartenant à une même phase.

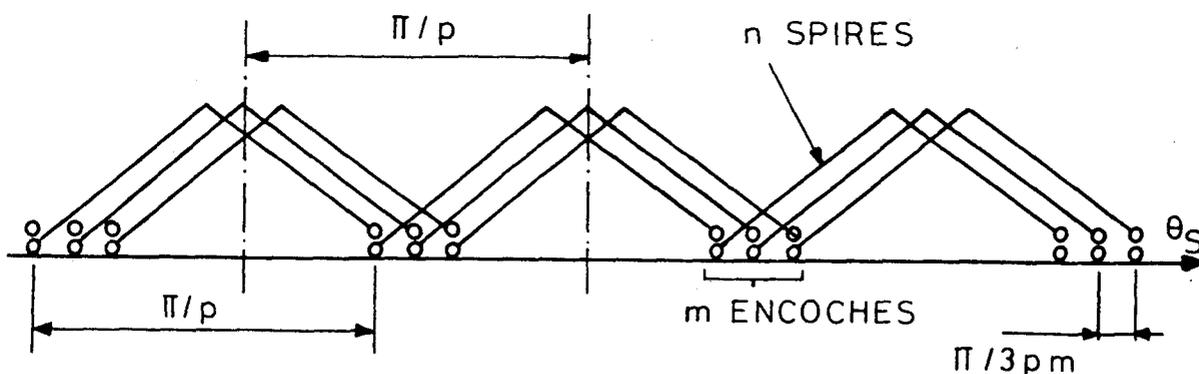


Figure III-1

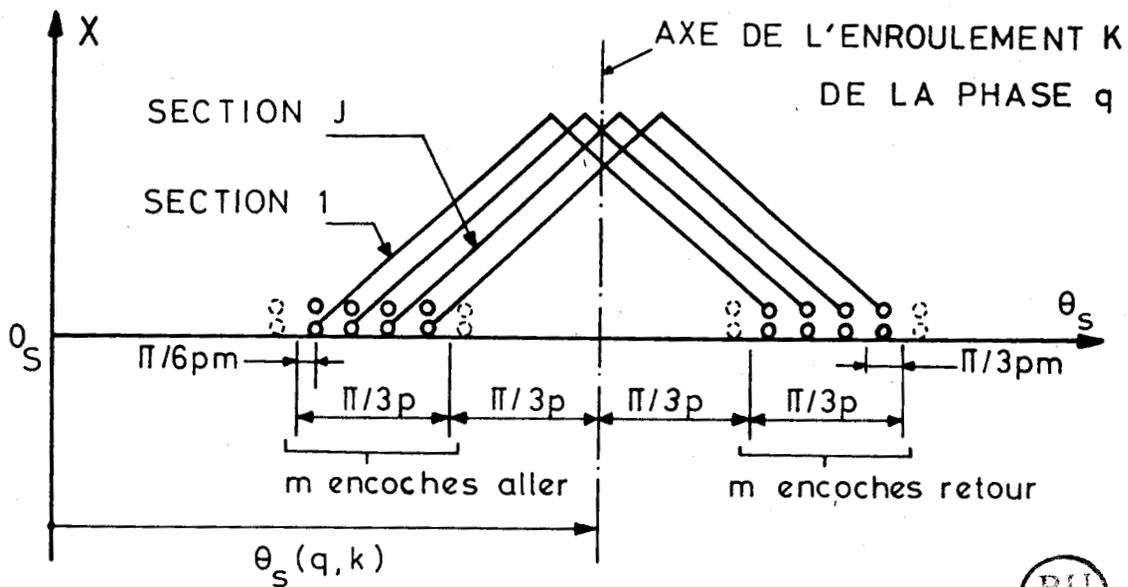


Figure III-3

A un angle θ_S compté à partir de l'axe $O_S X$, correspond un angle θ compté à partir de l'axe $O_R X$. Les relations de passage de θ_S à θ sont également identiques à celles [(II-15) et (II-16)] du chapitre II.

II- FORCES ELECTROMOTRICES

II.1. Forces électromotrices induites dans les sections

On peut calculer ces forces électromotrices en utilisant les relations (II-17) ou (II-17') du chapitre II. Dans celles-ci les angles $\theta(q, k, j)$ et $\theta'(q, k, j)$ correspondent, par la relation (II-15), aux angles $\theta_S(q, k, j)$ et $\theta'_S(q, k, j)$ tels que $\theta_S(q, k, j) = \gamma_S - \pi/2p$ et $\theta'_S(q, k, j) = \gamma_S + \pi/2p$. γ_S désigne ici l'angle que fait l'axe d'une section avec l'axe du décentrement.

Pour des valeurs données du nombre de pôles $2p$, du rapport y , du décentrement relatif x et de l'angle γ_S , la force électromotrice induite dans une section ne dépend pas du mode de connexion des sections.

Les résultats numériques du chapitre précédent, en particulier le rapport U/U_0 et l'écart de phase $\eta - \eta_0$, et les conclusions qu'on a pu en déduire restent donc ici valables.

II.2. Forces électromotrices induites dans les enroulements

On peut calculer ces forces électromotrices en utilisant les relations (II-18) ou (II-18') du chapitre II. Les angles $\theta_S(q,k,j)$ et $\theta'_S(q,k,j)$ qui interviennent dans ces calculs se déduisent de l'angle $\theta_S(q,k)$ qui repère l'axe d'un enroulement par les relations (II-13).

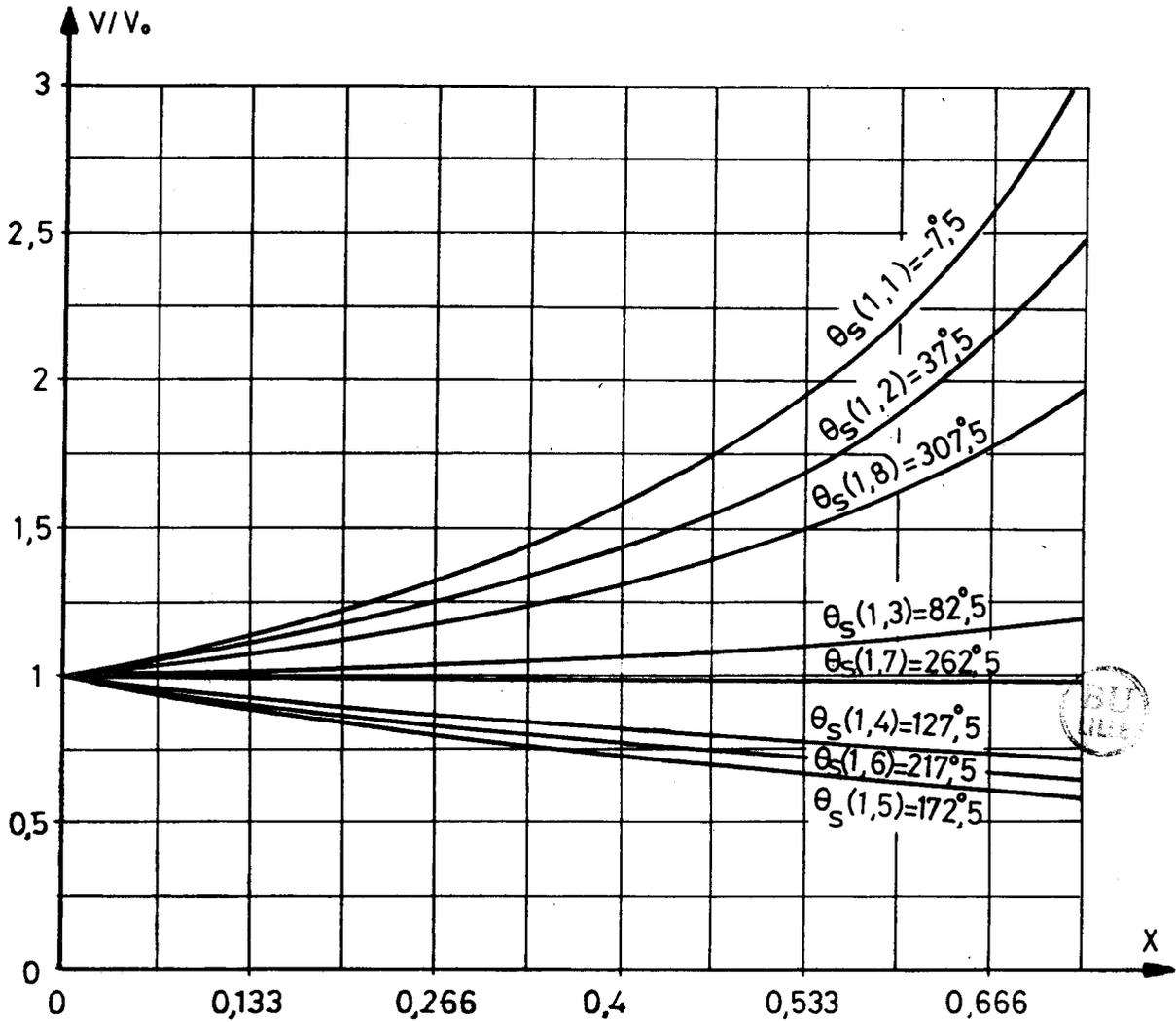
Pour des valeurs données du nombre de pôles $2p$, du rapport y , du décentrement relatif x , de l'angle $\theta_S(q,k)$ et du nombre d'encoches par pôle et par phase m , la force électromotrice induite dans un enroulement ne dépend pas du mode de connexion des enroulements.

Les résultats numériques du chapitre précédent, en particulier le rapport V/V_0 et l'écart de phase $\psi - \psi_0$, et les conclusions qu'on a pu en déduire restent donc ici valables.

Nous avons calculé (tableau III-1) puis tracé (figure III-4) V/V_0 en fonction de x pour $m=3$, $2p=8$, $y=500/3$ et pour $\theta_S(1,k)$ égal à $\theta_S(1,1) = -7^\circ,5$; $\theta_S(1,2)=37^\circ,5$; $\theta_S(1,3)=82^\circ,5$; $\theta_S(1,4)=127^\circ,5$; $\theta_S(1,5)=172^\circ,5$; $\theta_S(1,6)=217^\circ,5$; $\theta_S(1,7)=262^\circ,5$ et $\theta_S(1,8)=307^\circ,5$, ce qui correspond aux huit enroulements de la première phase de la machine expérimentale.

$\theta_S(1,K)$ x	$-7^\circ,5$	$37^\circ,5$	$82^\circ,5$	$127^\circ,5$	$172^\circ,5$	$217^\circ,5$	$262^\circ,5$	$307^\circ,5$
0	1	1	1	1	1	1	1	1
0,0666	1,0648	1,0514	1,0087	0,9643	0,9426	0,9537	0,9926	1,0392
0,1333	1,1386	1,1091	1,0188	0,9317	0,8915	0,9119	0,9865	1,0827
0,2	1,2235	1,1744	1,0305	0,9017	0,8456	0,8738	0,9816	1,1313
0,2666	1,3221	1,2491	1,0440	0,8740	0,8043	0,8390	0,9779	1,1861
0,3333	1,4381	1,3355	1,0593	0,8483	0,7668	0,8071	0,9752	1,2485
0,4	1,5767	1,4371	1,0767	0,8244	0,7326	0,7776	0,9735	1,3204
0,4666	1,7451	1,5588	1,0965	0,8020	0,7012	0,7503	0,9729	1,4047
0,5333	1,9544	1,7079	1,1188	0,7811	0,6727	0,7249	0,9732	1,5051
0,6	2,2217	1,8964	1,1441	0,7613	0,6462	0,7012	0,9745	1,6274
0,6666	2,5757	2,1445	1,1727	0,7427	0,6218	0,6791	0,9767	1,7804
0,7333	3,0684	2,4900	1,2052	0,7251	0,5991	0,6584	0,9798	1,9789

Tableau III-1 - $V/V_0(x)$

Figure III-4 $V/V_0(x)$

II-3- Forces électromotrices induites dans les phases

La force électromotrice totale de chaque phase $e(q)$ est la somme des forces électromotrices engendrées dans les $2p$ enroulements mis en série

$$e(q) = \sum_{k=1}^{2p} e(q,k) \quad (\text{III-19})$$

Mais avec les mêmes simplifications qu'au chapitre précédent, le rapport de l'amplitude $E(q)$ des forces électromotrices par phase à l'amplitude $E_0(q)$ qu'elles auraient en l'absence de décentrement est donné par les relations du chapitre II.

Nous avons calculé (tableau III-2) puis tracé (figure III-5) le rapport $E(q)/E_0(q)$ en fonction de x pour $2p=8$.

x	0	0,0666	0,1333	0,2	0,2666	0,3333	0,4
$E(q)/E_0(q)$	1	1,0022	1,009	1,0206	1,0375	1,0606	1,091

0,4666	0,5333	0,6	0,6666	0,7333
1,1306	1,182	1,2496	1,3404	1,467

Tableau III-2

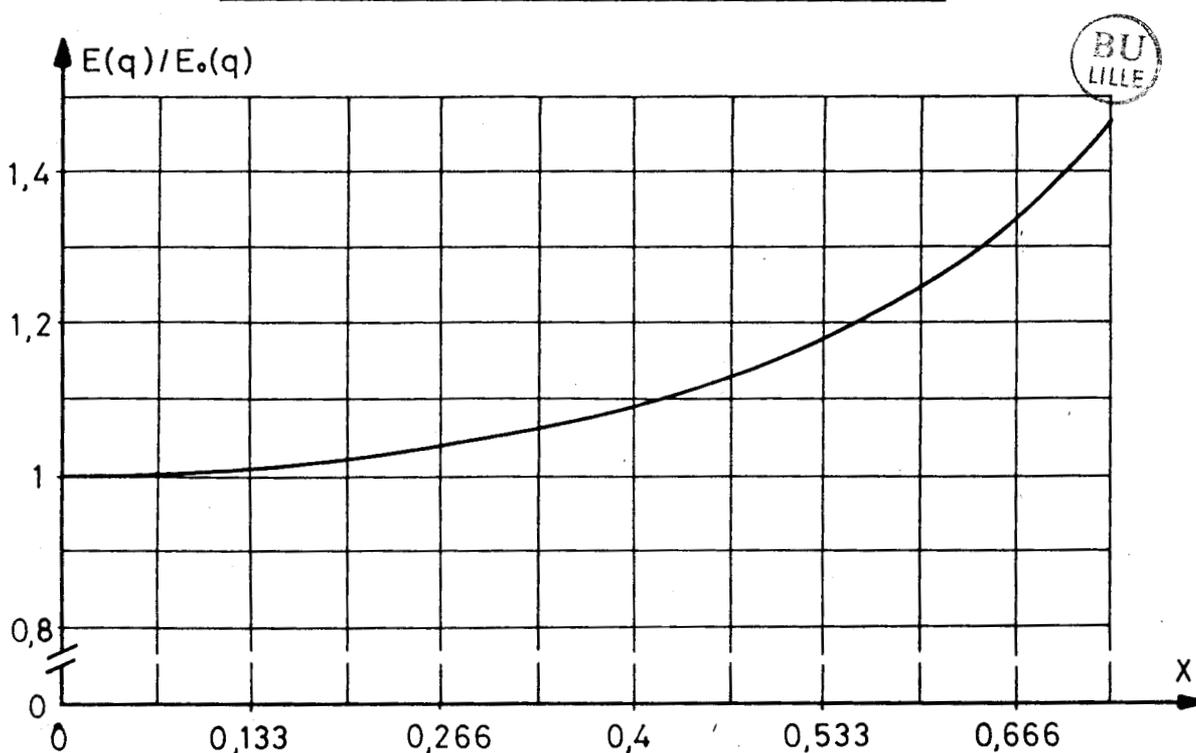


Figure III-5

III- COUPLAGE EN PARALLELE DES ENROULEMENTS

Pour une machine ayant $2p$ enroulements par phase, on peut réaliser un schéma de couplage comportant a voies en parallèle identiques à condition que $2p/a$ soit entier.

. Pour que les connexions soient courtes, on met en série dans chaque voie les enroulements voisins. La figure III.6 schématise le bobinage de la phase 1.

. Pour que l'effet du couplage en parallèle soit aussi indépendant que possible de la direction du décentrement qui peut être quelconque, il faut que l'ensemble formé par les voies en parallèle des 3 phases soit réparti aussi uniformément que possible.

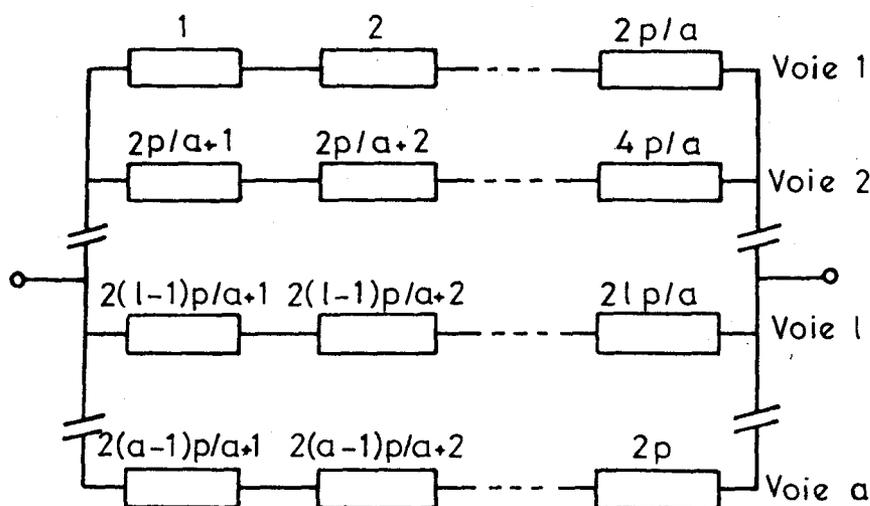


Figure III.6

Par exemple, pour une machine à $2p=8$ pôles dont on veut coupler les huit enroulements statoriques de chacune des phases en $a=2$ voies en parallèle,

la phase 1 est constituée de la voie 1 formée des enroulements 1,2,3 et 4 en série, en parallèle avec la voie 2 formée des enroulements 5,6,7 et 8 en série,

la phase 2 est constituée de la voie 1 formée des enroulements 3,4,5 et 6 en série, en parallèle avec la voie 2 formée des enroulements 7,8,1 et 2 en série,

et la phase 3 est constituée de la voie 1 formée des enroulements 5,6,7 et 8 en série, en parallèle avec la voie 2 formée des enroulements 1,2,3 et 4 en série (figure III-7.a).

Les axes des 3 circuits des courants de circulation sont décalés de $2\pi/3p+2\pi/p$, soit ici de 120° (figure III-7.b). Ils sont régulièrement répartis le long de l'armature statorique.



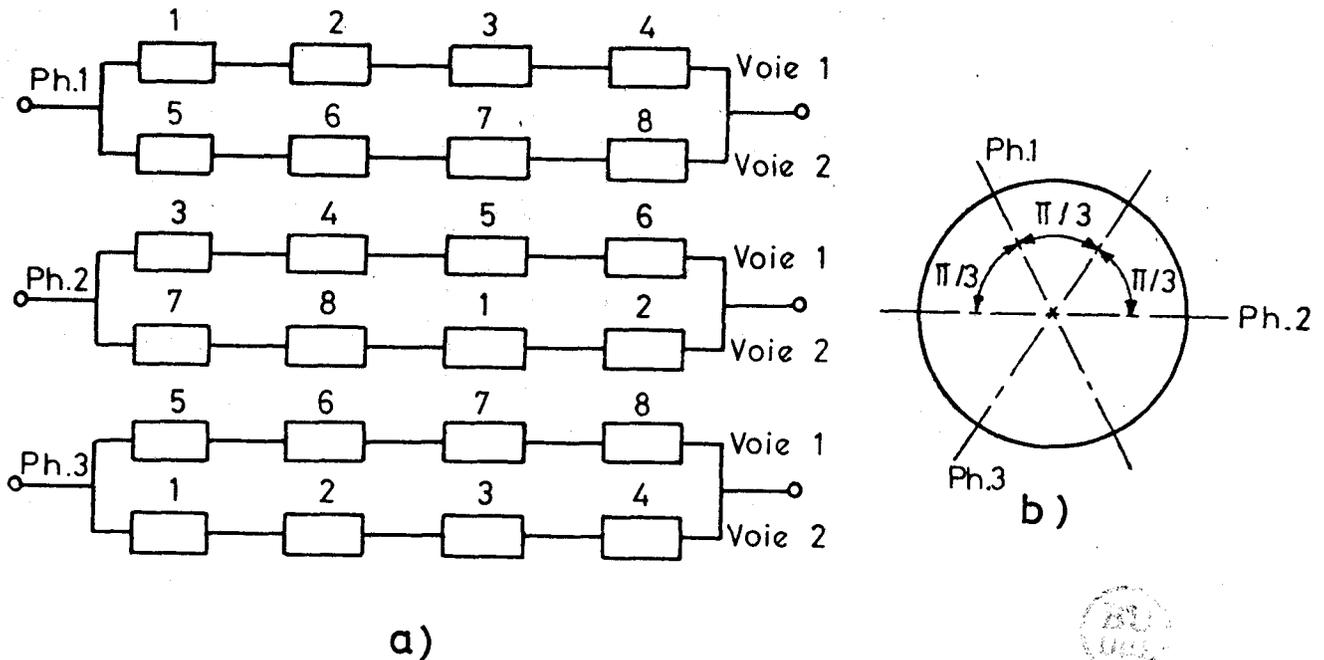


Figure III-7

D'une façon générale, si on repère par k_1 le premier enroulement de la première voie de la phase 1, par k_2 le premier enroulement de la première voie de la phase 2 et par k_3 le premier enroulement de la première voie de la phase 3, on doit avoir

$$k_2 - k_1 = \frac{(2p \text{ ou } p) - 2}{3}$$

$$k_3 - k_1 = 2(k_2 - k_1)$$

Avec $2p=8$, $k_2 - k_1 = 2$ et $k_3 - k_1 = 4$.

. Pour beaucoup de valeurs de $2p$, il existe plusieurs valeurs de a rendant entier le rapport $2p/a$, donc plusieurs valeurs possibles pour a ($2 \leq a \leq 2p$)

Par exemple pour $2p=8$, on peut réaliser $a=8, 4, 2$ ou 1 voies par phase, mais, à a donné, on peut former chacune des phases de g groupes identiques. Pour cela il faut que le rapport $2p/ag$ soit entier.

Par exemple pour $2p=8$, on peut réaliser

si $a = 8$, $g = 1$

si $a = 4$, $g = 1$ ou 2

si $a = 2$, $g = 1, 2$ ou 4 .

On verra dans le chapitre relatif aux vérifications expérimentales, les montages correspondant à ces différentes possibilités de couplage en parallèle des enroulements.

C H A P I T R E 4

PRESENTATION DE LA MACHINE EXPERIMENTALE

Une machine spéciale, susceptible de vérifier les résultats théoriques précédents, a été construite par la Société JEUMONT-SCHNEIDER. Après l'avoir décrite, nous allons en faire la reconnaissance, c'est-à-dire relever ses caractéristiques usuelles et déterminer ses principaux paramètres.

I- DESCRIPTION DE LA MACHINE EXPERIMENTALE

C'est une machine synchrone destinée particulièrement

- à mesurer l'effort radial dû au décentrement de l'axe du rotor par rapport à l'axe d'alésage statorique et ses variations en fonction de la valeur de ce décentrement.
- à étudier la réduction de cet effort par un choix convenable des enroulements statoriques et de leurs couplages.

I.1. Conception générale

Le schéma de la figure IV -1 donne la conception générale de la machine. Elle comprend :

- un stator (S) à circuit magnétique classique monté dans une carcasse (C) à fixation par pattes.

- un rotor (R) comportant :

- . un arbre particulièrement rigide en raison des efforts dus au décentrement,

- . huit pôles saillants avec leurs bobinages alimentés par une source extérieure à la machine. Les circuits amortisseurs de chaque pôle, formés de six barres en court-circuit, ne sont pas réunis entre eux,

- . quatre bagues (B), deux bagues principales d'excitation et deux bagues auxiliaires de mesure, et le porte-balais (PB) correspondant,

- un bâti (Bt) support de l'ensemble, extrêmement rigide destiné à recevoir la carcasse et les pattes des deux paliers pieds (P) à roulements. Les paliers sont démontables. La fixation de la carcasse sur le bâti a été particulièrement étudiée pour permettre le décentrement vertical à l'arrêt du stator par rapport à l'axe magnétique fixe du rotor. Le déplacement du stator est réalisé par système vis-écrou et le guidage est assuré par quatre broches (b). Des cales calibrées (c), placées entre le bâti et les pattes de la carcasse permettent de réaliser un décentrement donné,

- des grilles de protection (G) facilement amovibles.

I.2. Principales caractéristiques

La plaque signalétique de cette machine synchrone donne les renseignements suivants :

puissance apparente : $S = 150 \text{ KVA}$,

nombre de phases : $q = 3$,

nombre de pôles : $2p = 8$,

fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$,

facteur de puissance : $\cos \varphi = 0,9$,

tension d'induit : $220/380\text{V}$,

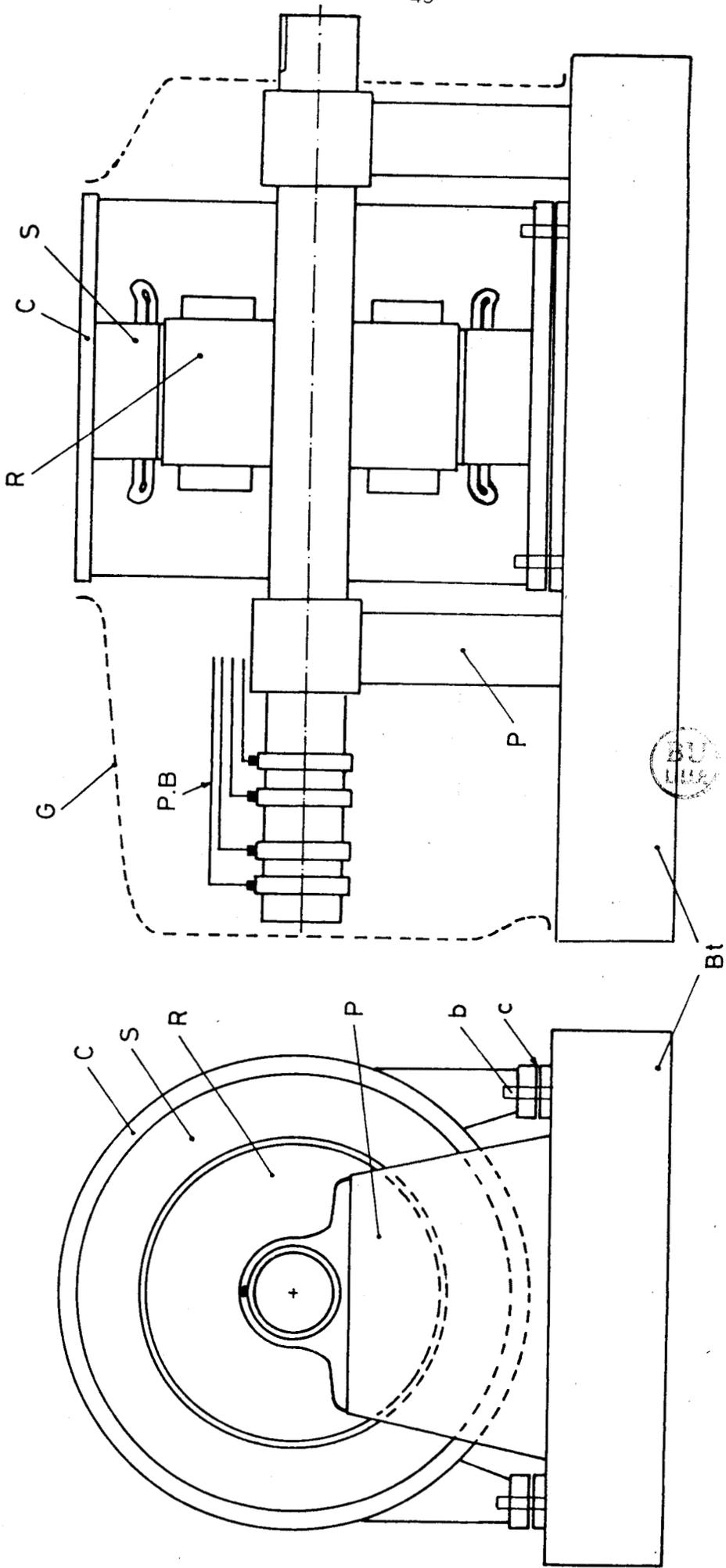


Figure IV.1

vitesse : $N = 750$ T/min

excitation séparée, tension d'excitation 70 V,

courant d'excitation $J = 52$ A.

L'encombrement de la machine est caractérisé par les dimensions suivantes :

longueur : 1.661 mm,

largeur : 1.020 mm,

hauteur : 1.146 mm,

masse : 1.820 kg.

Les éléments constitutifs de la machine possèdent les caractéristiques suivantes :

. Stator :

. diamètre d'alésage : $D=500$ mm ; la tolérance sur la cylindricité de l'alésage est 0,1 mm,

Longueur : $L = 230$ mm,

Nombre d'encoches par pôle et par phase : $m = 3$; le bobinage statorique est en sections à pas diamétral et à 2 côtés de sections par encoche ; ce bobinage n'est pas imprégné pour permettre éventuellement son changement ; les 48 entrées et sorties des 24 groupes de sections ou enroulements sont accessibles ,

Masse : 540 kg.

. Rotor :

Entrefer dans l'axe des pôles en l'absence de décentrement : $e_{\text{omin}} = 3$ mm ; tolérance de cylindricité du rotor : 0,1 mm,

Profil des pièces polaires particulièrement soigné pour avoir une répartition de l'induction dans l'entrefer voisine de la sinusoïde,

Décentrement maximum prévu : 2,6 mm,

survitesse possible : 20 %,

Pour limiter la flexion de l'arbre celui-ci a un diamètre ne descendant pas en-dessous de 140 mm pour une distance entre axes des paliers de 920 mm ; la flèche correspondant au décentrement maximum est inférieure à 0,02 mm.

Masse : 580 kg.

. Paliers-guidage :

En l'absence de câle, l'écart maximum entre les axes magnétiques du stator et du rotor est de 0,02mm,

le guidage du déplacement vertical est tel que, quel que soit le calage, l'écart entre les plans verticaux passant par l'axe du stator et de l'axe du rotor n'excède pas 0,02 mm,

le décentrement est variable de 0,2 en 0,2 mm entre 0 et 2,6 mm avec une précision de 0,02 mm pour toutes les positions.

I.3. Réalisation du banc d'essais

La puissance de la machine, comparée à celle disponible sur la plate-forme d'essais, ne nous permet pas de démarrer en asynchrone la machine afin de la faire fonctionner ensuite en moteur synchrone à vide.

Aussi nous avons accouplé la machine expérimentale à un moteur asynchrone d'entraînement de puissance 11 kW (ce qui représente un peu plus que les pertes de la machine synchrone dans son fonctionnement nominal) et de vitesse de synchronisme 750 T/min.

Cette façon de procéder est d'ailleurs très pratique pour réaliser les essais conduisant à la reconnaissance de la machine.

Bien que les bornes "entrée" et "sortie" des huit enroulements de chacune des trois phases soient accessibles, il est néanmoins difficile de se rendre compte de la position d'un enroulement, par rapport à l'axe du décentrement, en ne voyant que ses extrémités.

Aussi nous avons connecté toutes ces bornes à un tableau synoptique représentant schématiquement le bobinage statorique.

Lors des vérifications expérimentales nous serons amenés à modifier les couplages des enroulements de chacune des phases.

Pour des raisons de commodité, les bornes du tableau synoptique ont été reliées à un pupitre qui permet de réaliser rapidement (et sans erreur) tous les couplages prévus aux chapitres précédents.

La reproduction IV-2 donne une vue d'ensemble du banc d'essais. On distingue, à partir de la gauche, le moteur d'entraînement, l'accouplement, la machine expérimentale, le tableau synoptique et le pupitre.

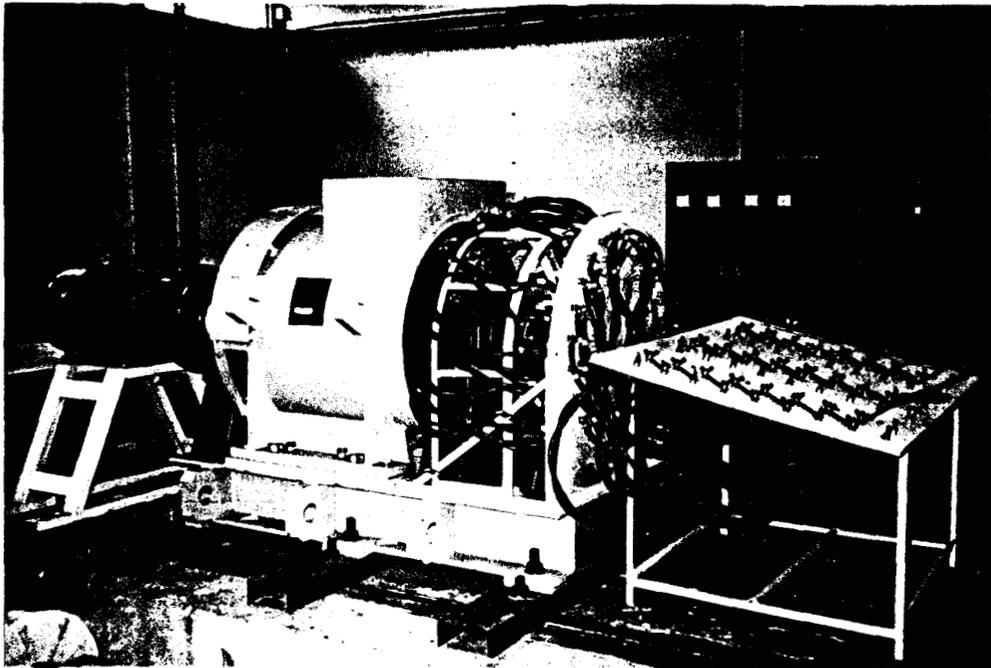


Figure IV-2

II- RECONNAISSANCE DE LA MACHINE EXPERIMENTALE

Cela consiste à relever les caractéristiques à puissance réduite de la machine puis à en déterminer ses paramètres.

Pour ne pas nuire à la présentation de ce mémoire, tous les relevés expérimentaux sont reportés en annexe, ne figurent ici que les courbes significatives.

Dans tous les essais résumés dans ce chapitre et aux chapitres suivants, la machine expérimentale n'était pas en charge et le moteur asynchrone d'entraînement avait toujours une vitesse suffisamment proche de 750 T/min pour qu'il ne soit pas nécessaire de faire de correction.

II.1. Les caractéristiques à puissance réduite

II.1.1. La caractéristique à vide $E_o(J)$ à $N = 750$ T/min

A l'aide du montage de la figure IV-3, nous avons tout d'abord vérifié que, à vide, l'induit donnait des forces électromotrices, fonctions sinusoïdales du temps, formant un système triphasé équilibré. Nous avons ensuite relevé la valeur efficace E_o de ces forces électromotrices à vide, entre phase et neutre, en fonction du courant d'excitation J que l'on a fait varier par valeurs croissantes, l'inducteur étant entraîné à la vitesse $N = 750$ T/min. Les résultats figurent au tableau IV.1 de l'annexe et permettent de tracer la courbe $E_o(J)$ à $N = 750$ T/min de la figure IV.4.

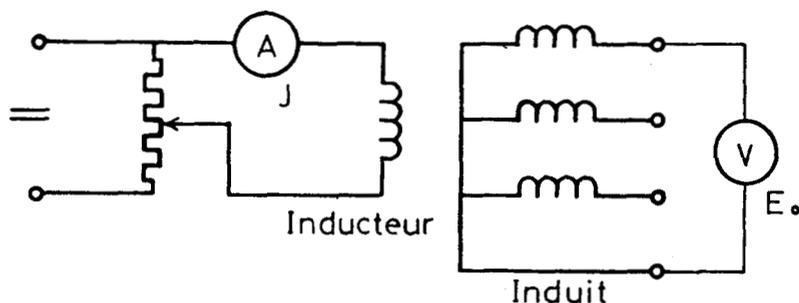


Figure IV.3



II.1.2. La caractéristique en court-circuit $I_{cc}(J)$ à $N = 750$ T/min.

Comme le montre la figure IV-5, il s'agit ici du court-circuit triphasé de l'induit. Nous avons relevé le courant d'induit I_{cc} en fonction du courant d'excitation J , l'inducteur étant entraîné à la vitesse $N = 750$ T/min. Les résultats sont donnés au tableau IV-2 de l'annexe et la figure IV.4. représente la courbe $I_{cc}(J)$ à $N = 750$ T/min.

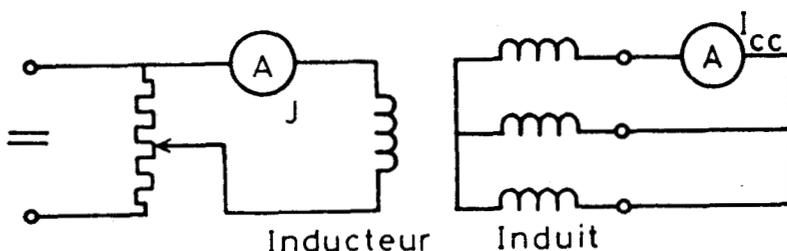


Figure IV.5

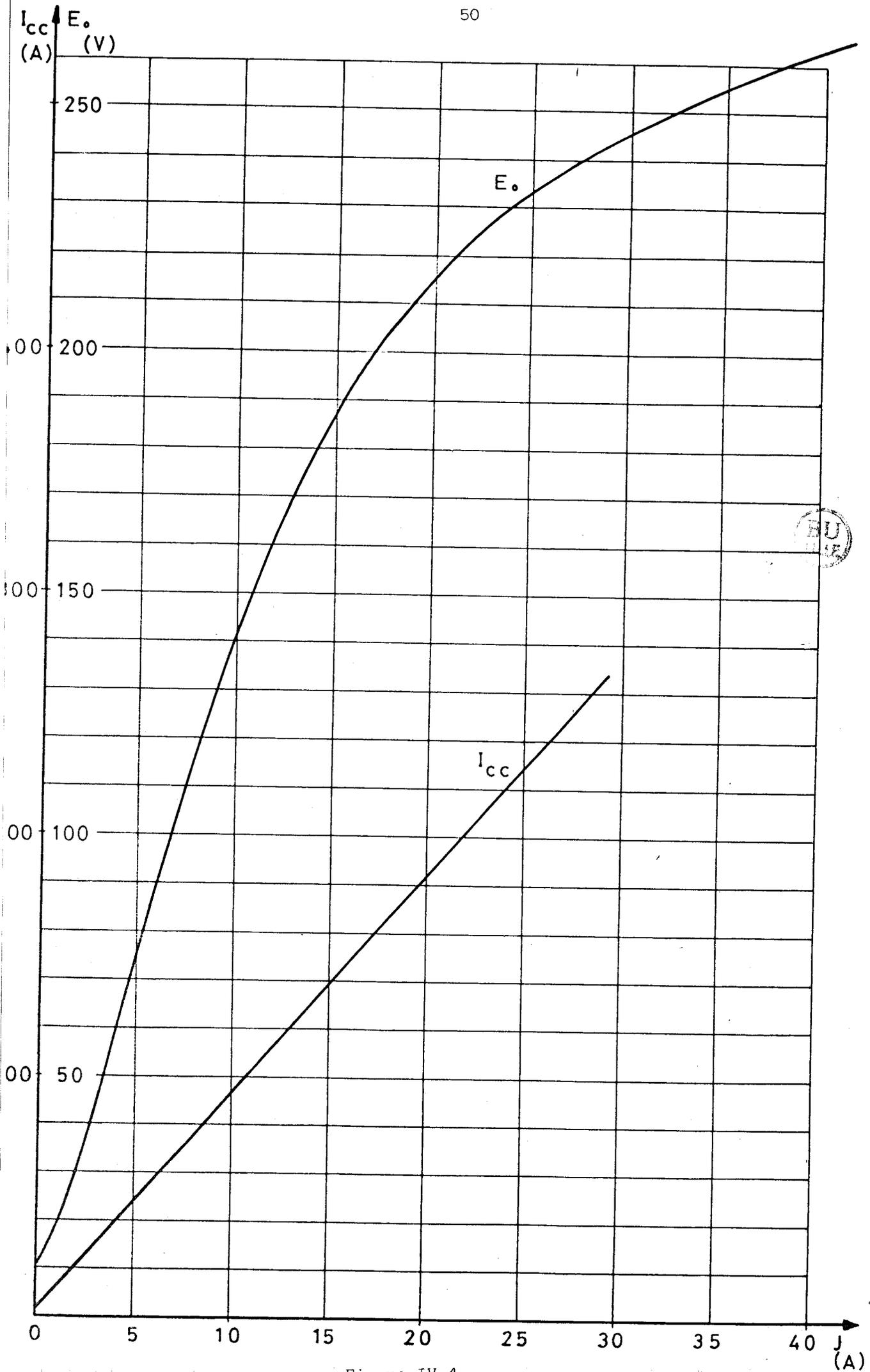


Figure IV.4

II.2. Détermination des paramètres

II.2.1. Résistance R de chaque phase de l'induit

On détermine cette résistance par la méthode ampèremètre-voltmètre en courant continu. Cette résistance étant faible on réalise le montage aval de la figure IV-6.

On procède avec des courants faibles et réglables par le rhéostat R_h , et rapidement, afin que la résistance ne subisse pas de variation due à la température. On obtient R par la relation $R = V/I$.

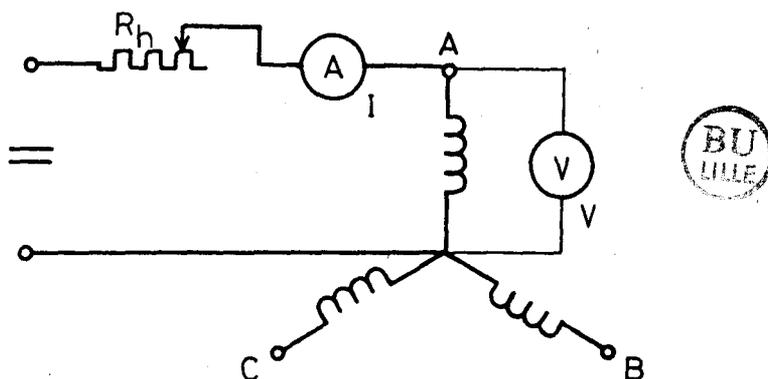


Figure IV.6

On constate que les résistances des trois phases, R_A , R_B et R_C sont pratiquement égales. La moyenne de toutes les mesures, consignées au tableau IV-3 de l'annexe, conduit à

$$R = 0,039 \Omega$$

II.2.2. Réactances longitudinale X_d et transversale X_q

Pour la mesure des réactances nous utiliserons les méthodes que présentent G. SEGUIER et F. NOTELET ⁽⁷⁾ puis J. LESENNE, F. NOTELET et G. SEGUIER ⁽⁸⁾ dans leurs ouvrages.

Nous travaillerons avec des courants d'excitation ou d'induit suffisamment faibles pour que le phénomène de saturation magnétique n'intervienne pas et que les réactances aient des valeurs constantes.

Pour les essais qui suivent, chaque phase de l'induit ne comporte qu'une voie et est donc formée de huit enroulements en série.

Pour déterminer X_d et X_q on fait un essai de glissement. On alimente l'induit par un système triphasé équilibré de tensions, fonctions sinusoïdales du temps, de valeur efficace V et de pulsation nominale ω (figure IV-7). Le circuit inducteur étant ouvert, on entraîne le rotor à une vitesse très voisine de la vitesse synchrone. On relève la valeur efficace minimale du courant statorique I_m et sa valeur maximale I_M . On calcule

$$X_d = \frac{V}{I_m} \text{ et } X_q = \frac{V}{I_M}$$

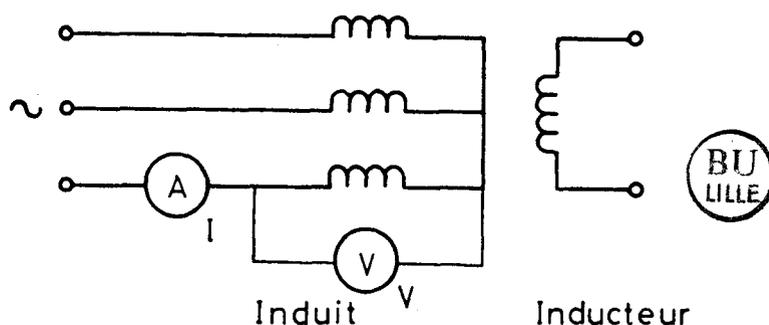


Figure IV.7

Le tableau IV-4 donne les mesures et les résultats obtenus à partir de différentes valeurs de V . La moyenne des résultats conduit à

$$X_d = 1,56\Omega \quad \text{et} \quad X_q = 1,02\Omega$$

ce qui donne en valeurs réduites

$$X_d = 161,7\% \quad \text{et} \quad X_q = 105,7\%$$

Remarque :

La détermination de la réactance à partir des caractéristiques à vide et en court-circuit donne X_d , car l'essai en court-circuit est un essai en déwatté particulier. On peut en effet vérifier que pour les faibles valeurs du courant d'excitation, on trouve, par cette méthode, une valeur de X_d très proche de $1,56\Omega$.

II.2.3. Réactance inverse X_i

La C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) recommande pour déterminer cette réactance, de réaliser l'essai en court-circuit diphasé (figure IV.8) et, à partir de la puissance P et du courant I , d'utiliser la relation

$$X_i = P / \sqrt{3} \cdot I^2$$

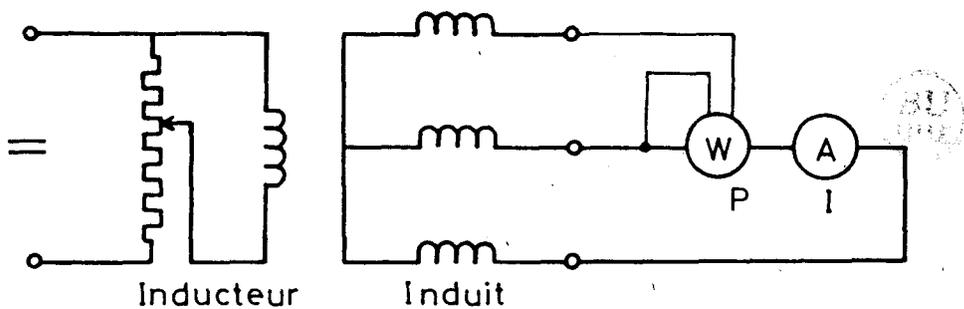


Figure IV.8

L'inducteur étant entraîné à la vitesse nominale $N = 750$ T/min, les mesures et résultats sont donnés au tableau IV.5 de l'annexe. La moyenne des résultats donne

$$X_i = 0,305\Omega$$

ce qui donne en valeur réduite

$$X_i = 31,6\%$$

II.2.4. Réactances subtransitoires longitudinale X''_d et transversale X''_q

Pour déterminer ces réactances on fait des essais d'application de la tension. Il s'agit d'essais en régime permanent effectués sur la machine à l'arrêt. Ils doivent être menés assez rapidement pour éviter un échauffement excessif des pièces massives. On applique une tension U de fréquence nominale mais de valeur réduite entre deux bornes de phase de l'induit, l'inducteur étant en court-circuit (figure IV.9).

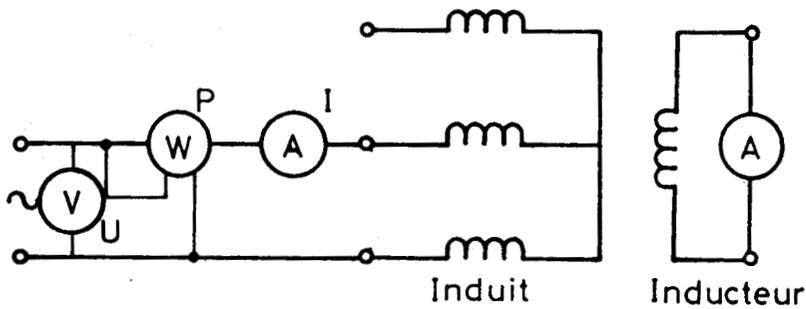


Figure IV.9

On amène le rotor dans la position où le courant induit dans l'inducteur est maximum, on est alors en position longitudinale. De la mesure de la tension U appliquée, du courant I et de la puissance P absorbée par le stator, on déduit la réactance subtransitoire longitudinale par

$$X''_d = \sqrt{Z''_d^2 - R''_d^2} \quad \text{avec } Z''_d = \frac{U}{2I} \quad \text{et } R''_d = \frac{P}{2I^2}$$

On amène ensuite le rotor dans la position transversale qui correspond à une valeur pratiquement nulle du courant dans l'inducteur. La mesure de U , I et P donne alors la réactance subtransitoire transversale par

$$X''_q = \sqrt{Z''_q^2 - R''_q^2} \quad , \quad \text{avec } Z''_q = \frac{U}{2I} \quad \text{et } R''_q = \frac{P}{2I^2}$$

Les mesures et calculs ont été reportés au tableau IV.6 de l'annexe. Nous trouvons

$$X''_d = 0,224\Omega \quad , \quad X''_q = 0,396\Omega$$

ce qui donne en valeurs réduites

$$X''_d = 23,2\% \quad \text{et } X''_q = 41,04\%$$

Remarque :

Nous pouvons vérifier que la moyenne arithmétique de X''_d et X''_q donne pratiquement X_i .

II.2.5. Réactance homopolaire X_0

Pour déterminer cette réactance on procède à l'alimentation en monophasé des trois phases. L'inducteur en court-circuit, le rotor entraîné à la vitesse nominale, on alimente sous une tension réduite U de fréquence nominale les trois phases statoriques groupées en série, de façon à ce que les courants des trois phases soient égaux et en phase (figure IV.10). On mesure la tension U , le courant I et la puissance P ; on en déduit l'impédance, la résistance et la réactance homopolaire par les relations suivantes

$$Z_0 = \frac{1}{3} \frac{U}{I} \quad ; \quad R_0 = \frac{1}{3} \frac{P}{I^2} \quad ; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

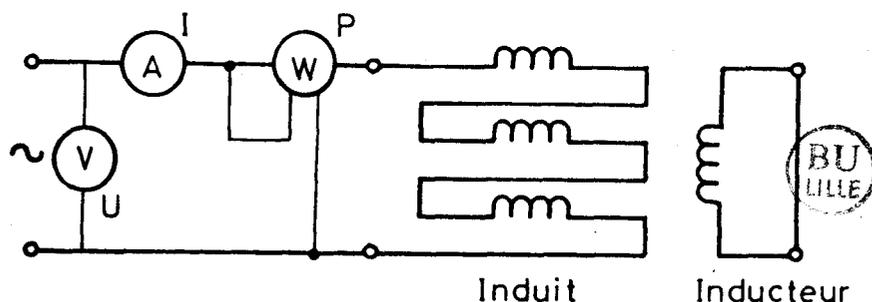


Figure IV.10

Les mesures et calculs, regroupés au tableau IV.7, donnent pour valeur moyenne

$$X_0 = 0,160 \, \Omega$$

ce qui donne en valeur réduite

$$X_0 = 16,58\%$$

Remarque :

Lors de la détermination des diverses réactances, les huit enroulements de chaque phase étaient en série. Chaque phase ne comporte alors que $a = 1$ voie d'enroulement. Nous avons fait d'autres essais en formant chaque phase à partir de a égal à 2, puis 4 puis 8 voies d'enroulement. Nous avons pu constater que les diverses réactances par enroulement étaient identiques.

C H A P I T R E 5

ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a pour but de voir les effets du décentrement sur les forces électromotrices induites à vide lorsque les huit enroulements de chaque phase sont en série et constituent une seule voie d'enroulement puis sur les courants de circulation qui apparaissent dès que l'on ne réalise plus la configuration précédente.

L'épaisseur minimale de l'entrefer e_{omin} étant égale à 3 mm nous avons fait varier le décentrement du rotor par rapport au stator de 2 en 2 dixièmes de mm de 0 à 2,2 mm. Le décentrement relatif x , égal à e/e_{omin} , a donc évolué de 0 à 0,733 par pas de 0,066.

I. ETUDE DES FORCES ELECTROMOTRICES A VIDEI.1. Les essais.

Pour cette étude on utilise le montage correspondant à l'essai à vide où chaque phase statorique est formée de huit enroulements en série (figure IV.3).

On réalise une certaine valeur du décentrement relatif x puis, le rotor étant entraîné à la vitesse nominale : $N = 750$ T/min, on règle le courant d'excitation à une valeur J . On mesure les forces électromotrices induites $E(q,k)$ dans chacun des 24 enroulements : $E(1,1) \dots E(3,8)$ puis celles induites $E(q)$ dans chacune des 3 phases : $E(1)$, $E(2)$ et $E(3)$.

D'une valeur à l'autre du décentrement nous avons modifié le courant d'excitation afin de travailler constamment en régime non saturé et de respecter ainsi cette hypothèse qui a été faite dans l'étude théorique.

Pour évaluer l'induction maximale B_m en un point de l'entrefer caractérisé par l'angle θ et lorsque le décentrement relatif est x on peut utiliser la relation :

$$B_m = B_{m0} / (1 - x \cos \theta)$$

où B_{m0} représente l'induction maximale à décentrement nul.

Le maximum de B_m se présente, théoriquement, au point de l'entrefer caractérisé par $\theta = 0$. Tant que l'on est en régime non saturé on peut admettre la proportionnalité des courants d'excitation aux inductions. Partant d'une induction B_{ms} correspondant à une valeur suffisante du courant d'excitation J_s , mais donnant encore un régime non saturé, on doit avoir, en cas de décentrement caractérisé par x , un courant d'excitation J tel que

$$J < J_s (1-x) \quad (V-1)$$

afin que l'induction B_m n'excède en aucun point de l'entrefer B_{ms} et que l'on soit assuré de cette façon de rester en régime non saturé. Toutes les mesures ont été consignées au tableau V.1 de l'annexe.

Nous pouvons remarquer qu'il est indispensable de faire les mesures avec un maximum de précision car à J et x donnés, les variations de $E(q,k)$ ne sont pas importantes.

I.2. Les résultats

A partir des mesures nous avons établi le tableau V.2 de l'annexe. Il donne les résultats expérimentaux que nous allons pouvoir comparer à ceux de l'étude théorique.

Pour chaque phase :

Les première et seconde lignes de ce tableau rappellent les valeurs de x et J pour lesquelles nous avons fait les mesures.

La troisième ligne donne la force électromotrice induite $E_o(q)$ par phase, à décentrement nul, déduite de la caractéristique à vide $E_o(J)$ à $N = 750$ T/min (figure IV-4) pour la valeur du courant d'excitation J .

On en déduit, à la quatrième ligne, la force électromotrice par enroulement $E_o(q,k) = E_o(q) / 8$.

Ensuite, pour chaque phase, la cinquième ligne rappelle $E(q)$.

La sixième ligne donne la somme arithmétique $\sum_{k=1}^8 E(q,k)$ des forces électromotrices induites dans les enroulements lorsqu'il y a décentrement.

Enfin les lignes 7 à 14 donnent les rapports $r(q,k) = E(q,k) / E_o(q,k)$ et la ligne 15 le rapport $r(q) = E(q) / E_o(q)$.

Les courbes de la figure V.1 donnent les variations des huit rapports $r(1,k)$ relatifs aux huit enroulements de la phase 1 en fonction de x . Chaque courbe est repérée par la position angulaire qu'occupe le centre de l'enroulement correspondant ($\theta = -7^\circ,5 ; \dots ; 307^\circ,5$) et par le repérage de l'enroulement $[(1,1); \dots; (1,8)]$.

Les courbes de la figure V.2 donnent les variations de $r(q,k)$ en fonction de θ pour trois valeurs du décentrement, l'un faible, l'autre moyen et le troisième fort et caractérisé par $x = 0,266 ; 0,466$ et $0,666$. Sur l'axe des abscisses nous avons également positionné les centres des 24 enroulements.

La courbe de la figure V.3 donne les variations des rapports $r(1)$, $r(2)$ et $r(3)$ (qui sont identiques) relatifs aux trois phases en fonction de x .

I.3. Vérifications. Interprétation des résultats.

- 1) L'examen du tableau V.1 montre bien, comme le laissait prévoir la théorie, qu'à décentrement donné du rotor par rapport au stator, les valeurs efficaces $E(q)$ des forces électromotrices induites dans chaque phase sont identiques.

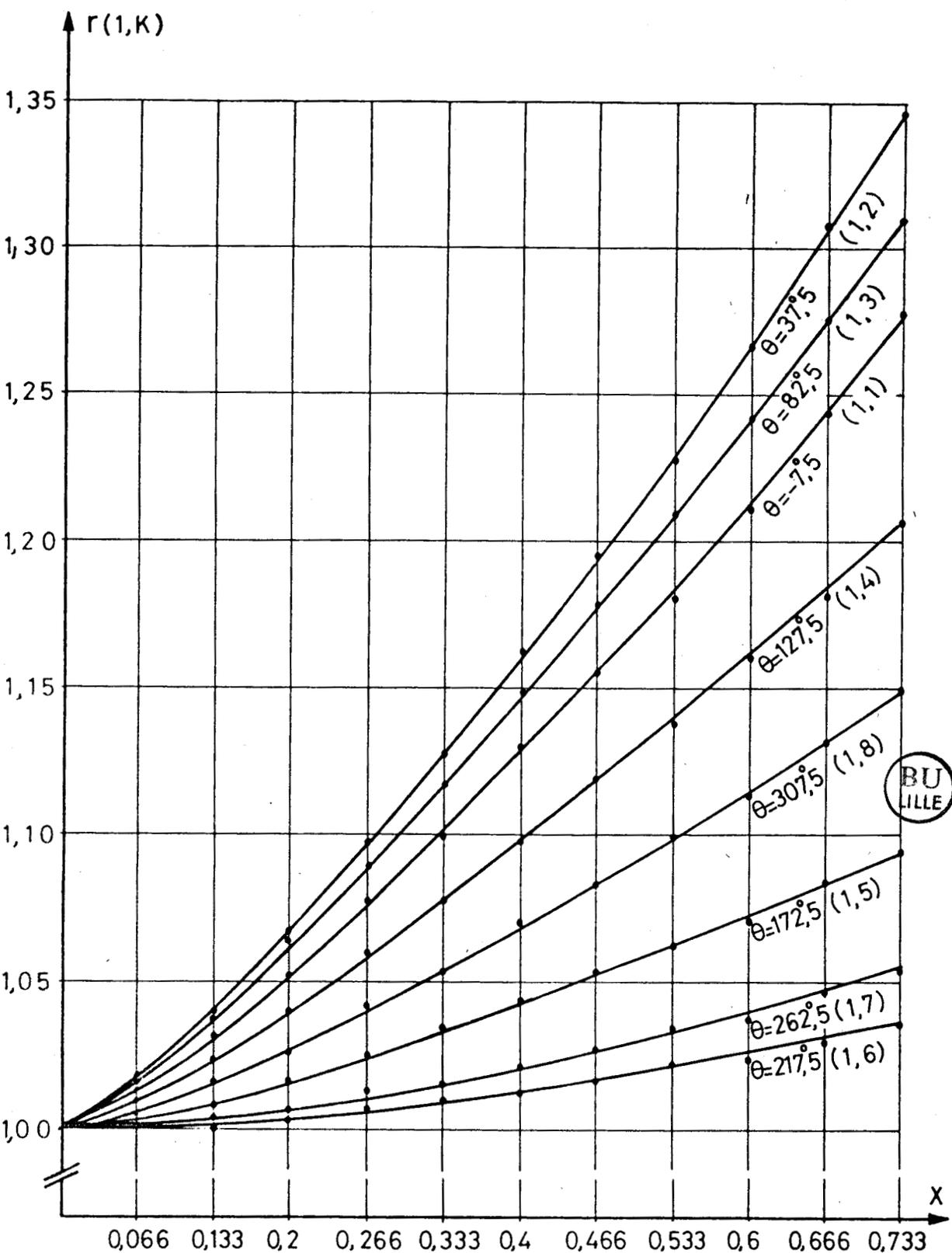


Figure V.1

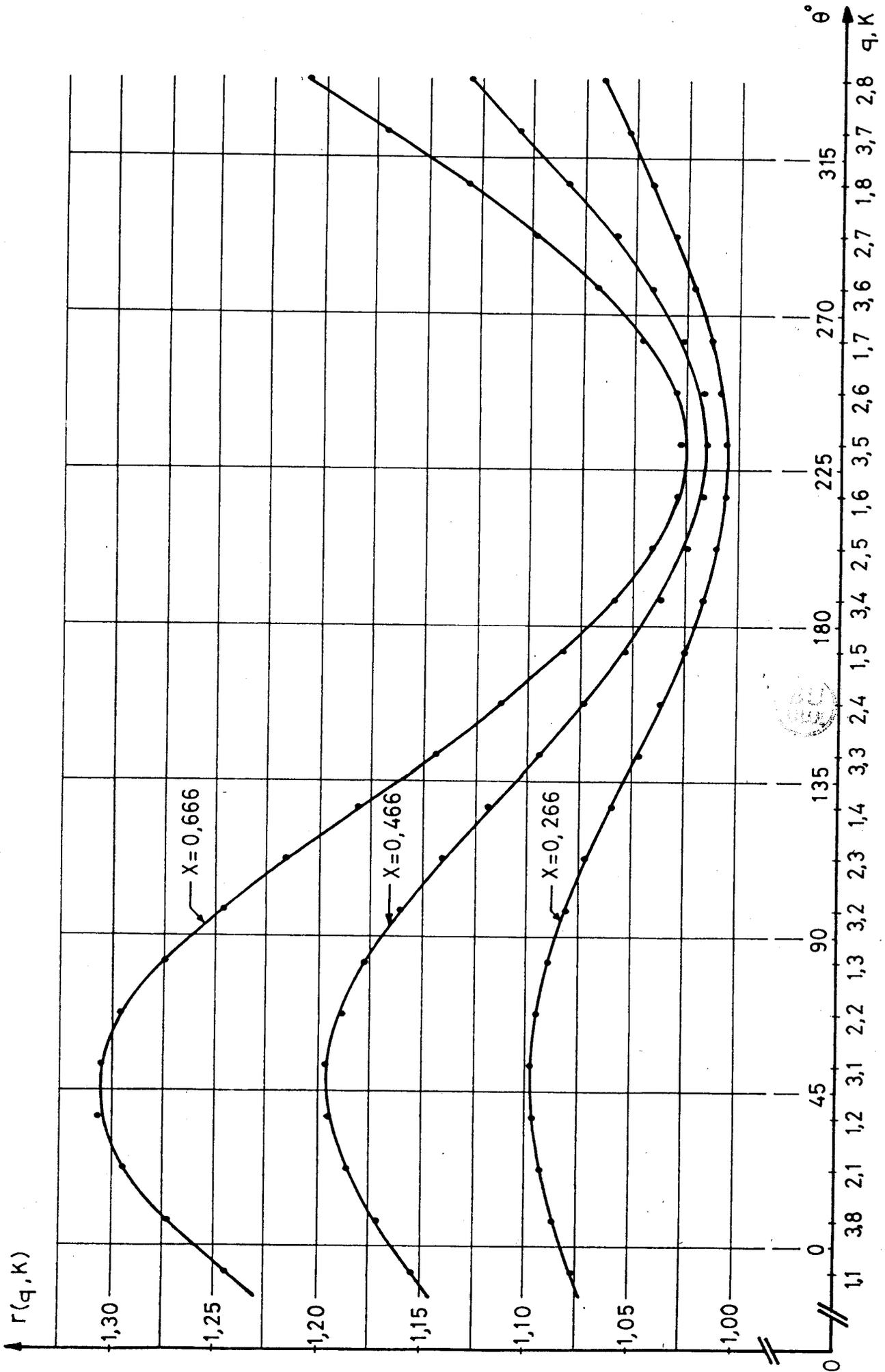


Figure V.2

2) Le tableau V.2 montre que, à décentrement donné, la somme arithmétique $\sum_{k=1}^8 E(q,k)$ des valeurs efficaces des forces électromotrices induites dans les enroulements constituant une phase est pratiquement égale à la valeur efficace $E(q)$ de la force électromotrice induite dans la phase et ceci quelle que soit la phase.

Ceci justifie l'hypothèse simplificatrice de la théorie qui considérait que les forces électromotrices induites dans les enroulements d'une phase étaient approximativement en phase.

Ces deux premières conclusions montrent que les forces électromotrices statoriques constituent pratiquement, malgré le décentrement, un système triphasé équilibré.

3) Les courbes donnant $r(1,k)$ en fonction de x de la figure V.1 sont à comparer à celles issues de la théorie, donnant V/V_0 en fonction de x de la figure III.4.

La comparaison de ces deux réseaux de courbes met en évidence des différences en ce qui concerne les positions relatives des différentes courbes et les valeurs numériques.

a) Les positions relatives des différentes courbes

Pour la phase 1, on s'attendait à avoir une force électromotrice maximale dans l'enroulement (1,1) dont le centre est caractérisé par $\theta = -7^{\circ},5$, c'est à dire dans l'enroulement dont le centre est le plus proche de l'endroit où l'entrefer est le plus réduit. Expérimentalement, on trouve que c'est l'enroulement (1,2) caractérisé par $\theta = 37^{\circ},5$ qui est le siège de la force électromotrice la plus élevée.

De la même façon, on pensait obtenir une force électromotrice minimale dans l'enroulement (1,5) caractérisé par $\theta = 172^{\circ},5$, diamétralement opposé à l'enroulement (1,1) et dont le centre est le plus proche de l'endroit où l'entrefer est le plus grand. Ici, on s'aperçoit que c'est l'enroulement (1,6).

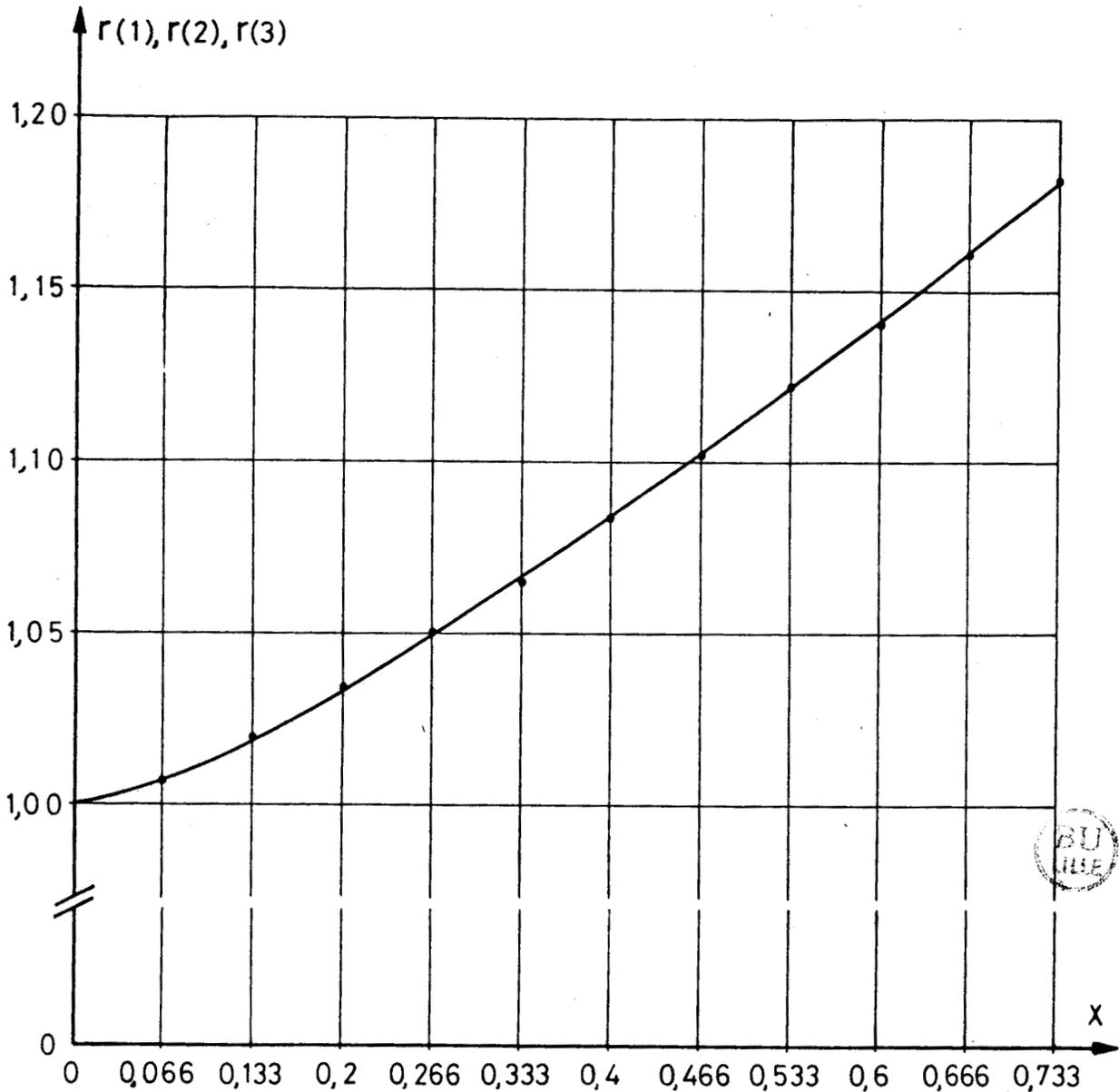


Figure V.3

L'induction n'est donc pas maximale et minimale dans l'axe du décentrement géométrique réel mais suivant un axe décalé, dans le sens de rotation, par rapport au décentrement et que nous appellerons axe magnétique.

Ceci est bien mis en évidence sur la figure V.2. Sans considération d'appartenance de phase, on voit que ce sont les enroulements (3,1) et (3,5) dont les centres sont les plus proches de cet axe magnétique.

Pour essayer de trouver l'origine de ce phénomène, nous nous sommes posés les questions suivantes :

. Ce décalage est-il dû à la rotation ?

Pour répondre à cette question nous avons fait l'essai statique suivant. Nous avons mesuré les flux $\phi(2,1)$ et $\phi(2,8)$ à travers l'enroulement (2,1) et son symétrique (2,8) par rapport à l'axe géométrique du décentrement, à l'aide d'un fluxmètre. Le circuit inducteur étant alimenté par un courant d'excitation J , nous avons mesuré ces flux à l'ouverture de ce circuit. Partant d'un axe de pôle nord situé successivement suivant les axes des enroulements (2,1) et (2,8) nous avons fait des mesures pour différentes positions du rotor par rapport au stator jusqu'à avoir effectué une rotation de 45° correspondant à une distance polaire.

Les mesures sont reportées au tableau V.3. de l'annexe et correspondent aux courbes de la figure V.4.

On constate que les courbes donnant $\phi(2,1)$ et $\phi(2,8)$ sont très voisines. Les valeurs numériques sont d'ailleurs pratiquement identiques pour $\theta = 0$ et 45° . Ces résultats sont logiques. Lorsque l'axe d'un pôle nord (ou sud) est confondu avec l'axe d'enroulement (2,1) ou (2,8), $\theta = 0^\circ$ (ou 45°), étant donnée la symétrie de ces positions par rapport à l'axe du décentrement, la réluctance de l'entrefer face à ce pôle est la même ; le flux est donc le même. En dehors de ces positions particulières, à cause du décentrement, cette symétrie n'est plus tout à fait réalisée. La quasi-égalité des flux $\phi(2,1)$ et $\phi(2,8)$ devrait entraîner l'égalité des forces électromotrices $E(2,1)$ et $E(2,8)$. Comme ce n'est pas le cas, la rotation est bien à l'origine du décalage de l'axe magnétique.

. Le sens de rotation a-t-il de l'importance ?

Pour répondre à cette question nous avons fait à nouveau un essai à vide. Pour le décentrement relatif $x = 0,666$ et le courant d'excitation $J = 3A$, nous avons relevé les forces électromotrices $E(q,k)$ et calculé les rapports $r(q,k)$, la vitesse de rotation étant $N = 750$ T/min successivement dans un sens puis dans l'autre.

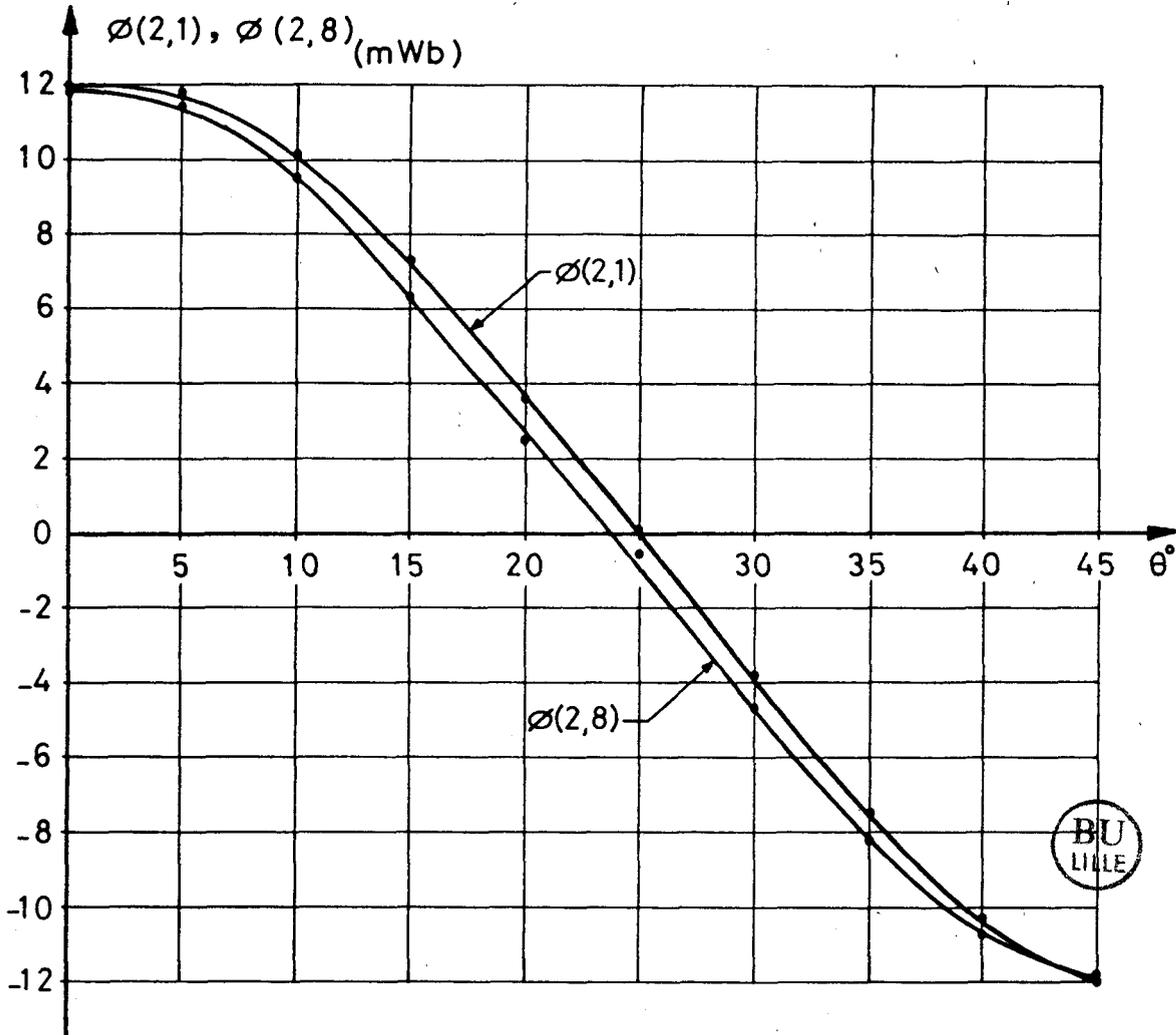


Figure V-4

Les mesures sont données au tableau V.4.1. de l'annexe. La figure V.5. donne les courbes $r(q,k)$ en fonction de θ° pour $N = \pm 750 \text{T/min}$.

On constate, à x et J donnés, que la forme de la courbe $r(q,k)$ en fonction de θ° reste la même, mais le décalage par rapport à l'axe du décentrement s'inverse comme le sens de rotation.

. La valeur de la vitesse de rotation a-t-elle de l'importance?

Pour le même décentrement et le même courant d'excitation nous avons complété les mesures précédentes en faisant un essai à $N=385 \text{T/min}$.

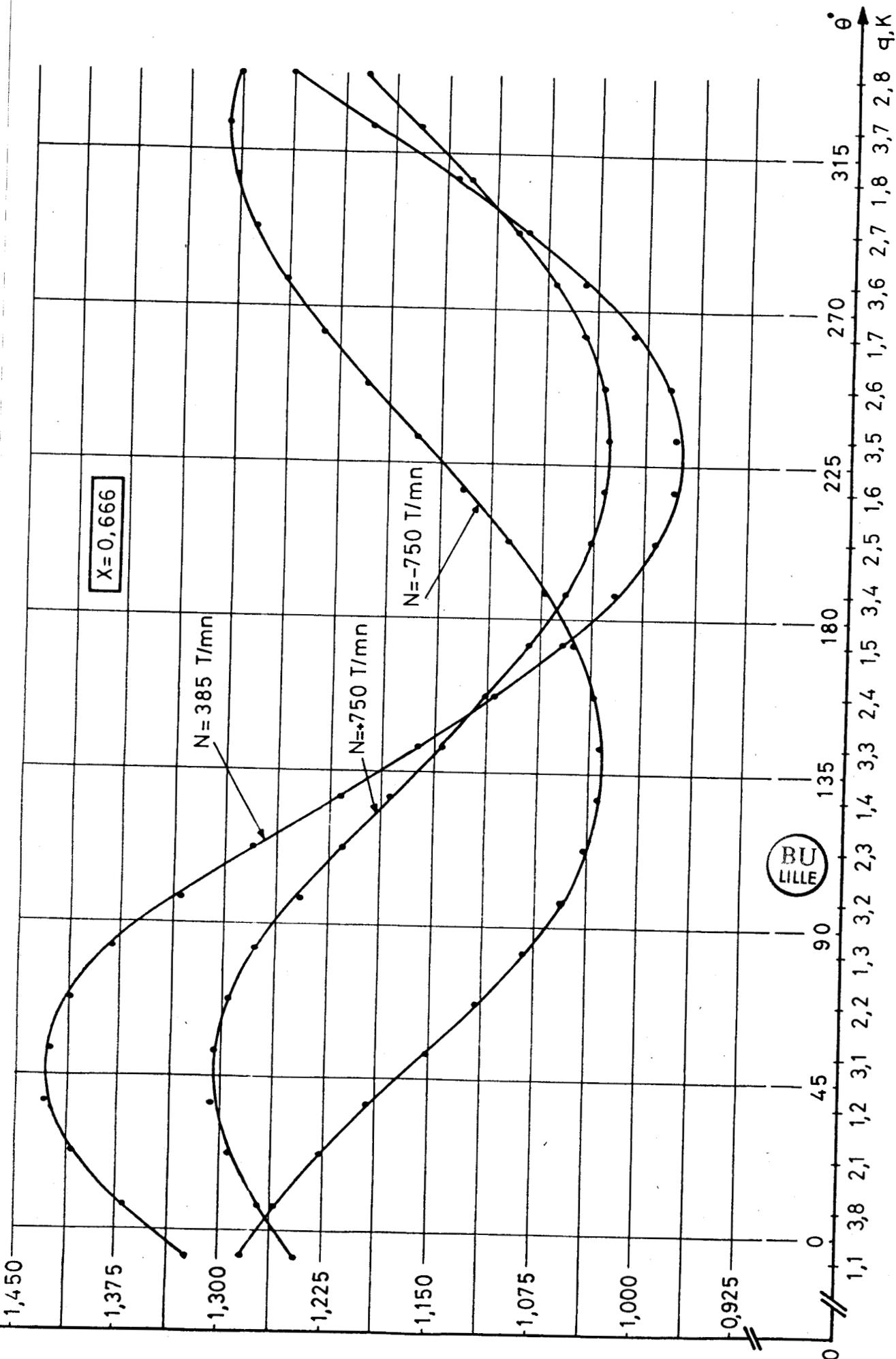


Figure V.5

Les mesures de $E(q,k)$ et les valeurs de $r(q,k)$ ont été reportées au tableau V.4.2. de l'annexe et la courbe $r(q,k)$ en fonction de θ° à la figure V.5.

On constate que le décalage de l'axe magnétique est le même aux vitesses de 750 et 385 T/min. Ce décalage est donc indépendant de la valeur de la vitesse de rotation.

Mais, par ailleurs, on voit que, à x et J donnés, on ne retrouve pas la même valeur du rapport $r(q,k)$ pour des vitesses de rotation N différentes. On devrait trouver des valeurs identiques tant que l'on est en régime non saturé et que le flux dans l'entrefer est le flux inducteur.

Cette étude du décalage de l'axe magnétique nous conduit donc à penser qu'il apparaît, dès qu'il y a rotation du rotor, un flux qui, dans l'entrefer, se superpose au flux inducteur. Comme tous les enroulements statoriques sont en circuit ouvert, ce flux complémentaire ne peut être dû qu'aux circuits amortisseurs de chaque pôle.

Lorsque l'axe d'un pôle nord, par exemple, passe de la position $\theta = 0^\circ$ à celle correspondant à $\theta = 180^\circ$, la réluctance de l'entrefer face à ce pôle augmente. Si l'on peut admettre la constance de la force magnétomotrice de ce pôle, son flux inducteur part d'une valeur maximale ($\theta = 0^\circ$), diminue pour atteindre une valeur minimale ($\theta = 180^\circ$). Le flux du circuit amortisseur de ce pôle, dû à la variation du flux inducteur et opposé à celle-ci va donc renforcer le flux inducteur. Le flux du circuit amortisseur partant d'une valeur nulle pour $\theta = 0$, doit donc augmenter, passer par une valeur maximale, diminuer pour s'annuler à nouveau pour $\theta = 180^\circ$. On raisonnerait de la même façon en considérant un pôle sud. L'enroulement dont la force électromotrice est maximale est donc celui dont le centre est le plus proche du point de l'entrefer où le flux résultant aux flux inducteur et amortisseur passe par des valeurs extrêmes les plus grandes.

De la même façon, en considérant le déplacement d'un pôle nord ou sud de 180° à 360° , on montrerait qu'il existe un point de l'entrefer, diamétralement opposé au précédent, où le flux résultant passe par des valeurs extrêmes les plus faibles.

Dans le cas de notre machine expérimentale, les enroulements sièges de forces électromotrices maximale et minimale sont les enroulements diamétralement opposés (3,1) et (3,5). Le décalage de l'axe magnétique est environ de 45° dans le sens de rotation. Ce décalage est pratiquement indépendant du décentrement relatif x .

b) Les valeurs numériques

La comparaison des réseaux de courbes des figures III-4 et V.1 donnant V/V_0 et $r(1,k)$ en fonction de x , montre aussi, outre le positionnement relatif différent de ces courbes, que les valeurs numériques théoriques et expérimentales sont sensiblement différentes.

Tout d'abord, on s'attendait à avoir des rapports $r(q,k)$ plus grands que l'unité pour tous les enroulements dont le centre est en un point où l'entrefer est réduit, et plus petit que un pour tous ceux dont le centre est en un point où l'entrefer est augmenté. On constate expérimentalement que tous les rapports $r(q,k)$ sont plus grands que un.

De plus, pour le premier type d'enroulement, le rapport $r(q,k)$ bien que supérieur à l'unité, est néanmoins inférieur à V/V_0 et ceci d'autant plus que le centre de l'enroulement est proche de $\theta = 0^\circ$. Par exemple, pour $x = 0,733$ et pour l'enroulement (1,1) ($\theta = -7,5^\circ$), le rapport $r(1,1)$ ne représente que 42% de la valeur théorique V/V_0 correspondante.

Pour les enroulements du second type, le rapport $r(q,k)$ supérieur à l'unité, est donc, à fortiori, plus grand que V/V_0 et ceci d'autant plus que le centre de l'enroulement est plus proche de $\theta = 180^\circ$. Par exemple, pour x valant encore 0,733 et pour l'enroulement (1,5) ($\theta = 172^\circ,5$), le rapport $r(1,5)$ représente 183% de la valeur théorique V/V_0 correspondante.

Pour les enroulements dont les centres sont proches de 90° et 270° les valeurs de $r(q,k)$ sont assez proches de V/V_0 . Par exemple, toujours pour $x = 0,733$, pour l'enroulement (1,3) ($\theta = 82^\circ,5$), on a $r(1,3) = 1,09V/V_0$ et pour l'enroulement (1,7) ($\theta = 262^\circ,5$), on a $r(1,7) = 1,08V/V_0$.

Quand x augmente, l'ensemble des courbes $r(q,k)$ de la figure V.1. est donc moins divergent que celui des courbes V/V_0 de la figure III.4.

Les écarts numériques sont parfois si importants que nous sommes amenés à nous poser les deux questions suivantes :

. tous les rapports $r(q,k)$ étant plus grand que un, cela signifie que l'induction maximale B_m en tout point de l'entrefer ne descend pas, malgré le décentrement, en dessous de B_{m0} . Peut-on encore, s'il existe des flux dus aux circuits amortisseurs, supposer la constance de la force magnétomotrice relative à chaque pôle ?

. L'observation, à l'oscilloscope, de la forme d'onde des forces électromotrices induites dans les enroulements en fonction du temps met en évidence des courbes approximativement sinusoïdales mais écrêtées. Peut-on admettre que l'induction face à chaque point fixe de la périphérie du stator est une fonction sinusoïdale du temps ?

4) Les courbes donnant $r(1)$, $r(2)$ et $r(3)$ en fonction de x représentées à la figure V.3, sont confondues comme le prévoyait la théorie. Cette courbe unique est à rapprocher de celle déduite de la théorie et représentée à la figure III.5.

. A décentrement donné, la comparaison entre ces deux courbes met à nouveau en évidence des différences numériques. La valeur expérimentale du rapport $r(q) = E(q)/E_0(q)$ est un peu plus forte que la valeur théorique tant que x n'excède pas 0,366. Mais à partir de cette valeur du décentrement relatif, c'est la valeur théorique qui devient la plus grande. L'écart augmente alors rapidement avec x .

II. COUPLAGE EN PARALLELE DES ENROULEMENTS STATORIQUES

Dès que l'on couple en parallèle les enroulements de chacune des phases, le décentrement fait apparaître des courants de circulation.

Dès la fin du chapitre III, nous avons indiqué les différents couplages possibles. Chaque phase peut être constituée de a voies en parallèle ; la valeur $a = 1$ n'est pas à retenir car elle ne donne pas lieu à des courants de circulation. Chaque voie comporte k/a enroulements. Grâce à $(g-1)$ connexions équipotentielles on peut ensuite constituer chaque phase de g groupes identiques en série. Chaque groupe est formé de a circuits en parallèle et dans chaque dérivation il y a k/ag enroulements.

A partir de $k = 8$, les différents couplages possibles seront obtenus en réalisant :

$$a = 8,$$

$$a = 4 \text{ et } g = 1 \text{ et } 2$$

$$a = 2 \text{ et } g = 1, 2 \text{ et } 4.$$

II.1. Les essais

La vitesse de rotation étant toujours la vitesse nominale $N = 750T/min$, pour chaque couplage possible et pour chaque décentrement relatif x , nous avons alimenté le bobinage inducteur par le même courant d'excitation J que dans l'essai à vide précédent. De cette façon, à x et J donnés, le tableau V.1. nous donne alors les valeurs des forces électromotrices $E(q,k)$ induites à vide dans chacun des enroulements.

Dans ces conditions, nous avons mesuré les tensions $E_r(q,k)$ et les courants de circulation $I_c(q,k)$ relatifs à tous les enroulements, et les tensions $E_r(q)$ aux bornes des phases.

A x et J donnés, les écarts entre $E(q,k)$ et $E_r(q,k)$ sont faibles. Une grande précision dans les mesures est indispensable. Celle-ci étant d'ailleurs insuffisante pour les décentrement relatifs très faibles, nous n'avons reproduit ici que les mesures correspondantes à $x \geq 0,2$.

Les différents couplages possibles des enroulements des diverses phases ont été schématisés à la figure V.6. Les mesures sont consignées au tableau V.5. de l'annexe.

II.2. Les tensions

Quelles que soient les valeurs de x et J et quel que soit le couplage (sauf pour $a = 8$ pour lequel la question ne se pose pas) le tableau V.5 montre que la somme arithmétique des tensions induites dans les enroulements en série est pratiquement égale à la tension résultante. Par exemple :

$$\text{pour } a = 4, g = 1 \text{ et } 2 : E_r(q,1) + E_r(q,2) + \dots + E_r(q,7) + E_r(q,8) = E_r(q),$$

pour $a = 2$, $g = 1$: pour la phase 1, par exemple,

$$E_r(1,1) + \dots + E_r(1,4) \neq E_r(1,5) + \dots + E_r(1,8) \neq E_r(1)$$

pour $a = 2, g = 2$: pour la phase 1, par exemple,

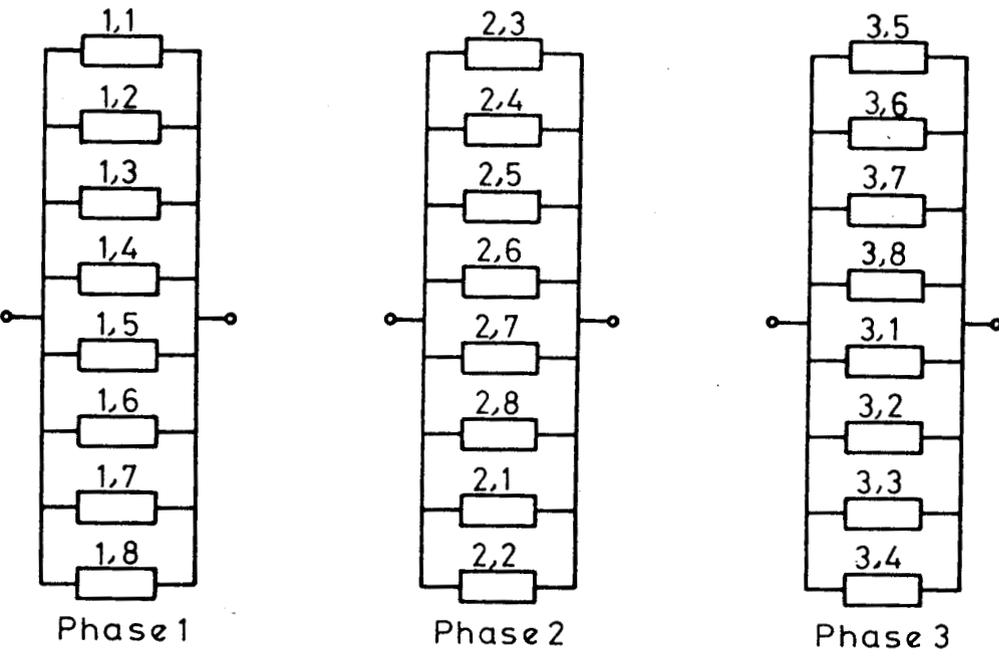
$$E_r(1,1) + E_r(1,2) = E_r(1,5) + E_r(1,6) = E_r(AA')$$

$$E_r(1,3) + E_r(1,4) = E_r(1,7) + E_r(1,8) = E_r(A'A'')$$

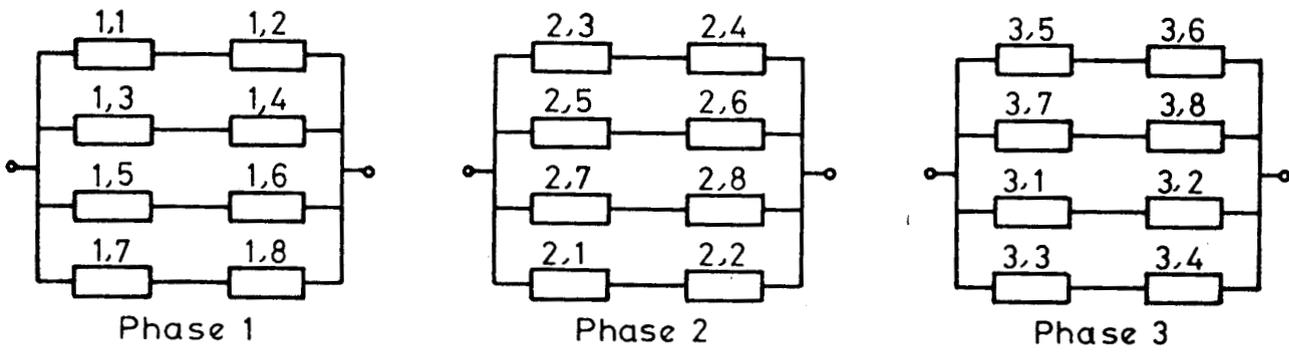
$$E_r(AA') + E_r(A'A'') = E(1)$$

pour $a = 2$, $g = 4$: pour la phase 1, par exemple,

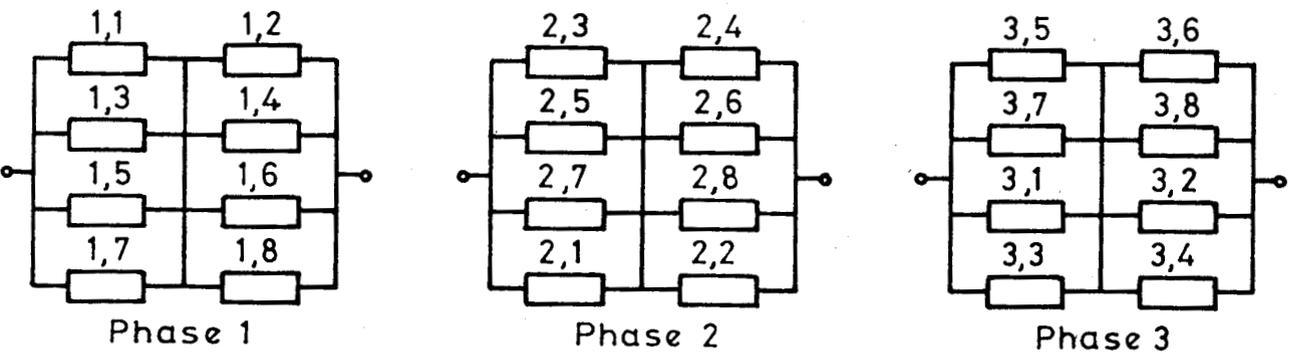
$$E_r(1,1) + \dots + E_r(1,4) = E(1).$$



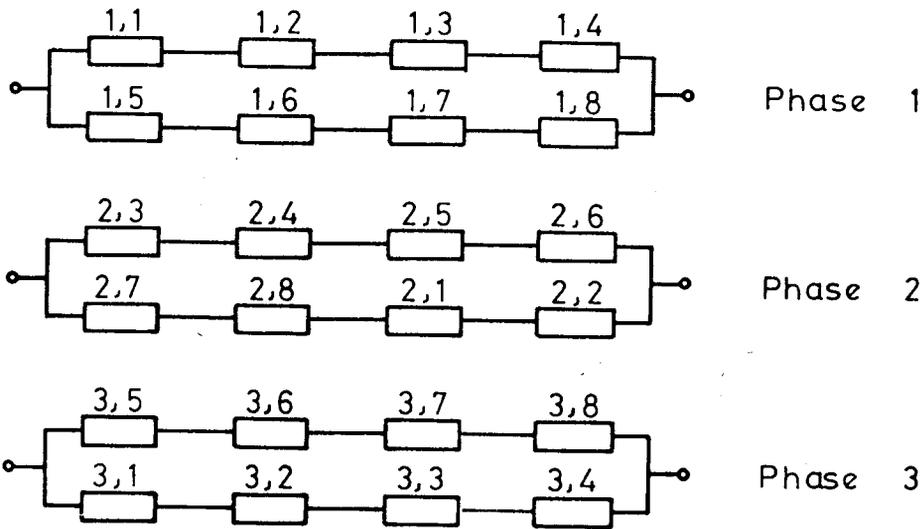
a) $a=8$



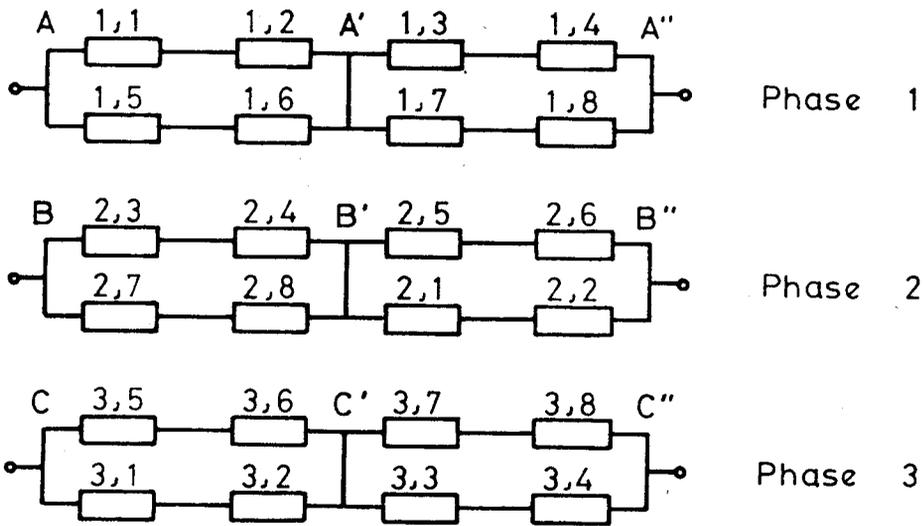
b) $a=4, g=1$



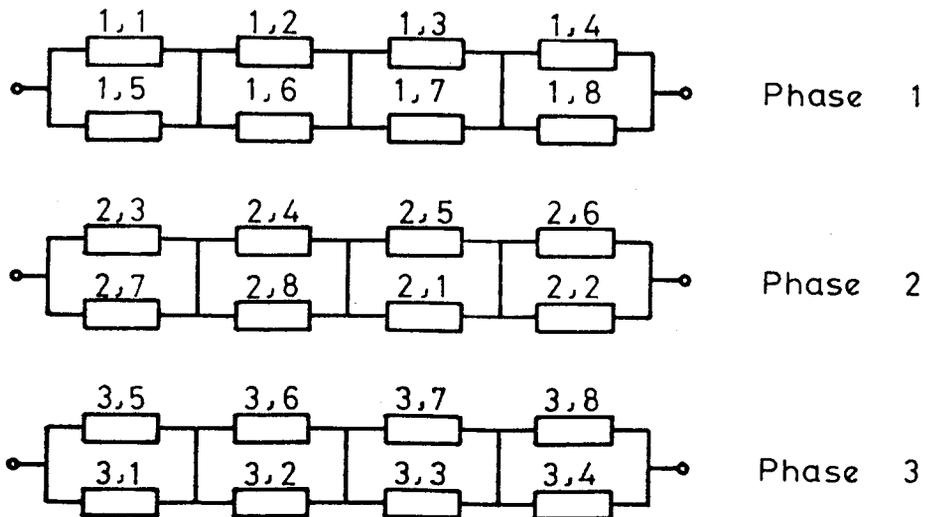
c) $a=4, g=2$



d) $a=2, g=1$



e) $a=2, g=2$



f) $a=2, g=4$

Figure V.6

On peut donc admettre, comme on l'a déjà fait pour les forces électromotrices à vide, que les tensions apparaissant entre divers points d'une phase sont en phase.

Le tableau V.5 montre aussi que, à x et J donnés, les connexions équipotentielles répartissent également, aux bornes de chaque groupe, la tension de la phase. Par exemple :

$$\text{pour } a = 4, g = 2 : E_r(q,1) = E_r(q,2) = E_r(q)/2$$

pour $a = 2, g = 2$: pour la phase 1, par exemple,

$$E_r(AA') = E_r(A'A'') = E_r(1)/2$$

pour $a = 2, g = 4$: pour la phase 1, par exemple,

$$E_r(1,1) = E_r(1,2) = E_r(1,3) = E_r(1,4) = E_r(1)/4$$

On remarque aussi que, à x et J donnés, et pour un couplage donné, les tensions $E_r(q)$ des trois phases sont égales. De plus, à x et J donnés et pour un nombre de voies donné, la valeur numérique des tensions $E_r(q)$ ne dépend pratiquement pas du nombre de groupes.

D'un couplage à l'autre, à x et J donnés, les tensions $E_r(q)$ se déduisent simplement les unes des autres. On a :

$$E_r(q) \text{ pour } a=2 = 2E_r(q) \text{ pour } a=4 = 4E_r(q) \text{ pour } a=8 \quad (V.2)$$

Si l'on observe plus particulièrement le couplage correspondant à $a=8$, pour lequel $E_r(q,k) = E_r(q)$, quel que soit x , on peut déduire cette tension $E_r(q)$ de l'essai à vide. Nous nous contenterons de le montrer ici sur un seul exemple.

La figure V.7 représente la courbe donnant les variations de $E(q,k)$ en fonction de θ pour $x=0,466$, déduite de l'essai à vide. L'axe magnétique est caractérisé par $\theta = 49^\circ,5$. La valeur de $E(q,k)$ lue sur cette courbe pour $\theta = 49^\circ,5 + 90^\circ = 139^\circ,5$, représente $E_r(q)$ pour $a=8$, soit 10,39V. Ceci se vérifie quel que soit x .

A partir de cette remarque et des relations V.2, on peut donc toujours prévoir, pour toute valeur de x et pour tout type de couplage et à partir de l'essai à vide, la tension $E_r(q)$ aux bornes des phases lorsqu'il y a des courants de circulation.

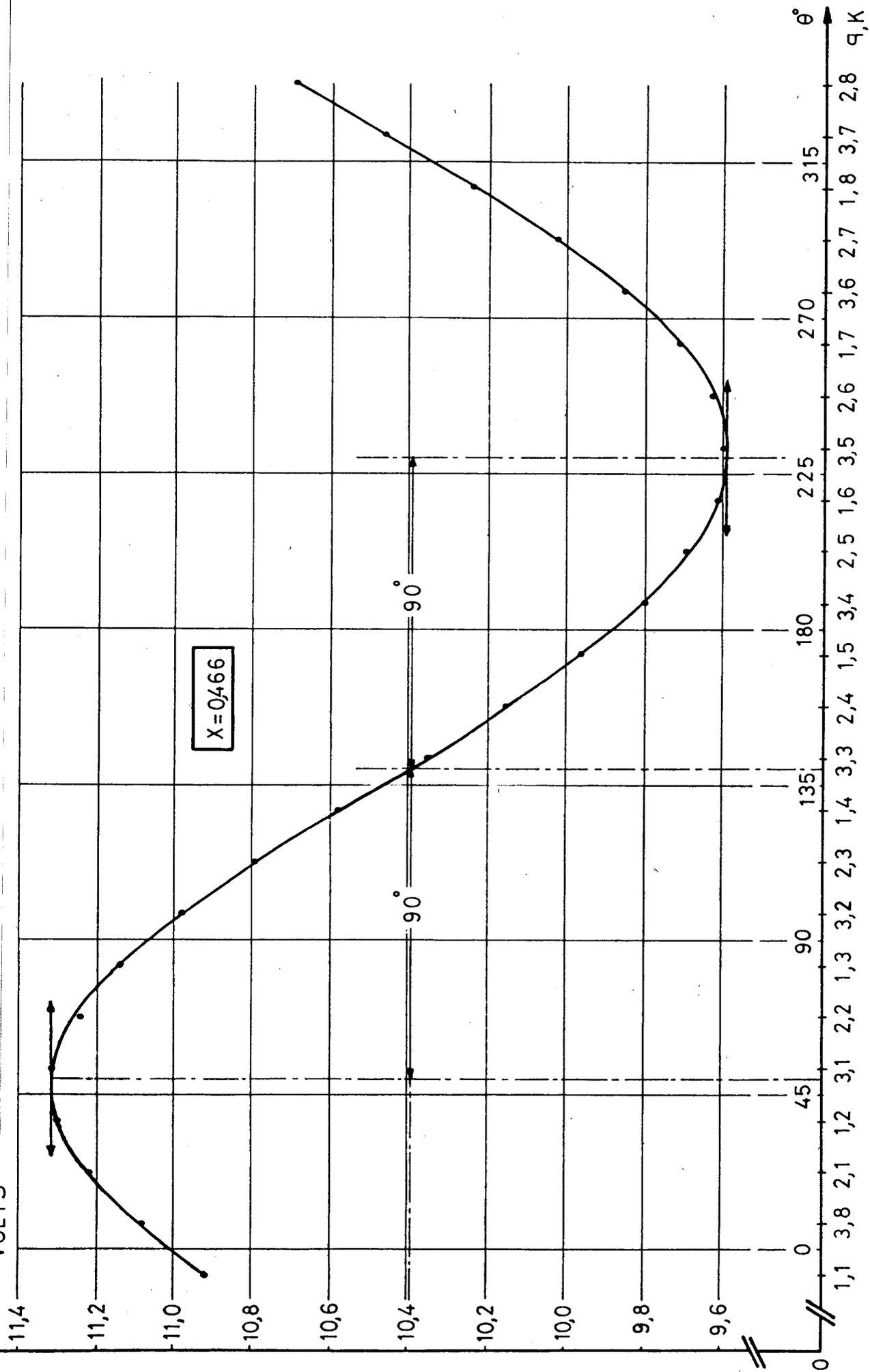


Figure V.7



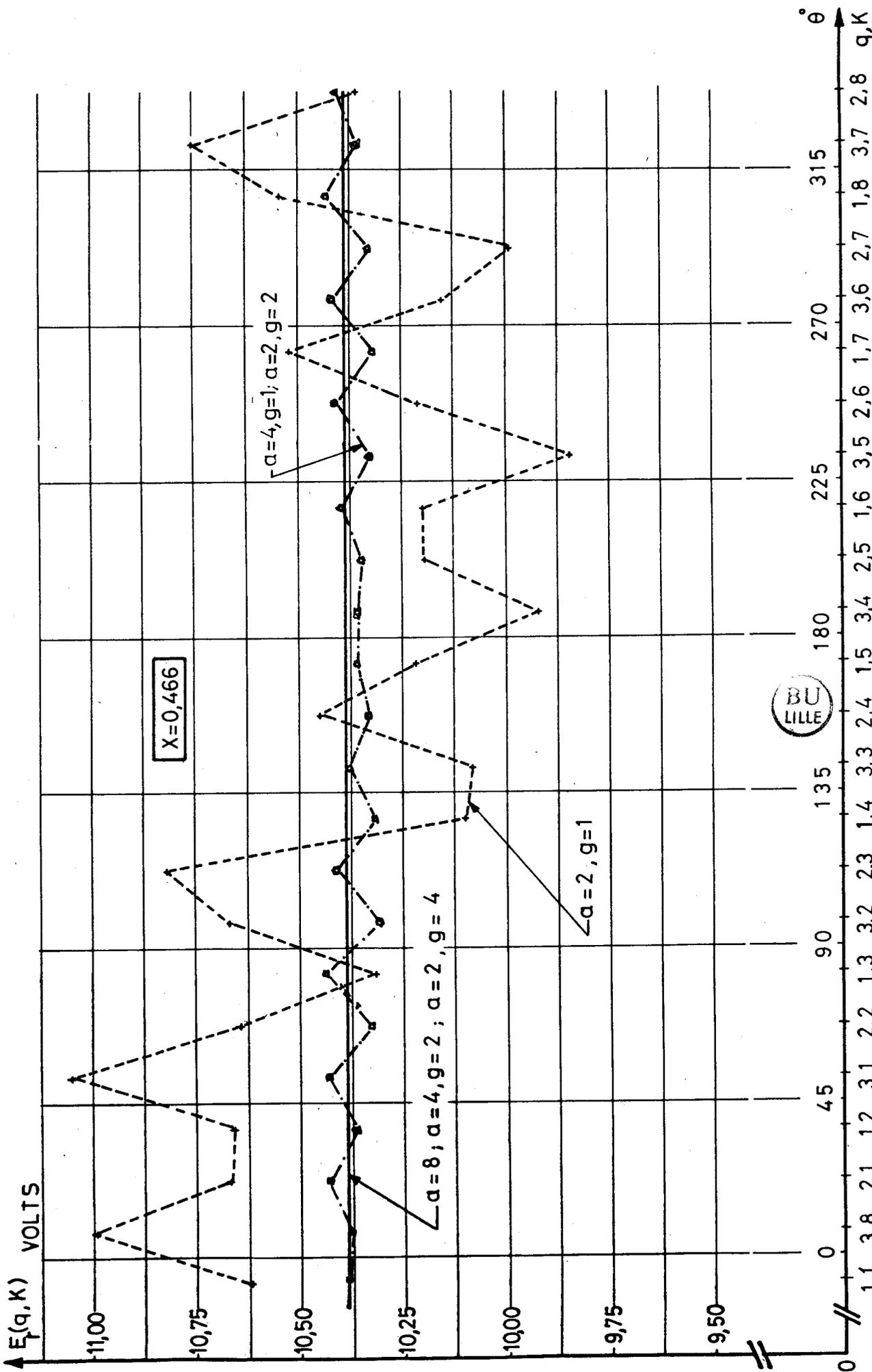


Figure V.8



Pour montrer l'influence du couplage sur les tensions $E_r(q,k)$ nous avons tracé, à la figure V.8, pour x valant 0,466 et pour les six possibilités de couplage, les courbes $E_r(q,k)$ en fonction de θ .

Pour les couplages caractérisés par $a=8$; $a=4, g=2$ et $a=2, g=4$, les courbes sont des horizontales d'ordonnées 10,39V (valeur déterminée ci-dessus). Pour $a=4, g=1$, et $a=2, g=2$, les tensions $E_r(q,k)$ fluctuent un peu autour de 10,39V et pour $a=2, g=1$ les variations sont beaucoup plus importantes.

La tension $E(q)$ mesurée lorsqu'il y a décentrement, mais dans un fonctionnement à vide et correspondant à huit enroulements en série, permet de prévoir, connaissant le couplage, la tension $E_r(q)$ aux bornes de chaque phase quand les courants de circulation existent, et compte tenu des remarques précédentes, la tension aux bornes de chaque dérivation.

Par exemple, pour $x = 0,466$, $E(q) = 83,4V$

- . Si $a=8$, $E_r(q)=83,4/8 = 10,43V$ (10,39V)
- . Si $a=4$, $E_r(q)=83,4/4 = 20,85V$ (20,74V)
- . Si $a=2$, $E_r(q)=83,4/2 = 41,70V$ (41,56V)

Les valeurs entre parenthèses correspondent aux relevés expérimentaux (voir tableau V.5).

II.3. Les courants de circulation

Pour montrer l'influence du couplage sur les courants de circulation $I_c(q,k)$ nous avons tracé, à la figure V.9, pour x valant 0,466 et pour les six possibilités de couplage, les courbes $I_c(q,k)$ en fonction de θ .

A x et J donnés, c'est pour les couplages $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ que ces courants sont les plus intenses. Ils sont nettement plus faibles pour les couplages $a=4, g=2$; $a=2, g=1$ et $a=2, g=4$, et encore un peu plus réduits pour le couplage $a=8$.

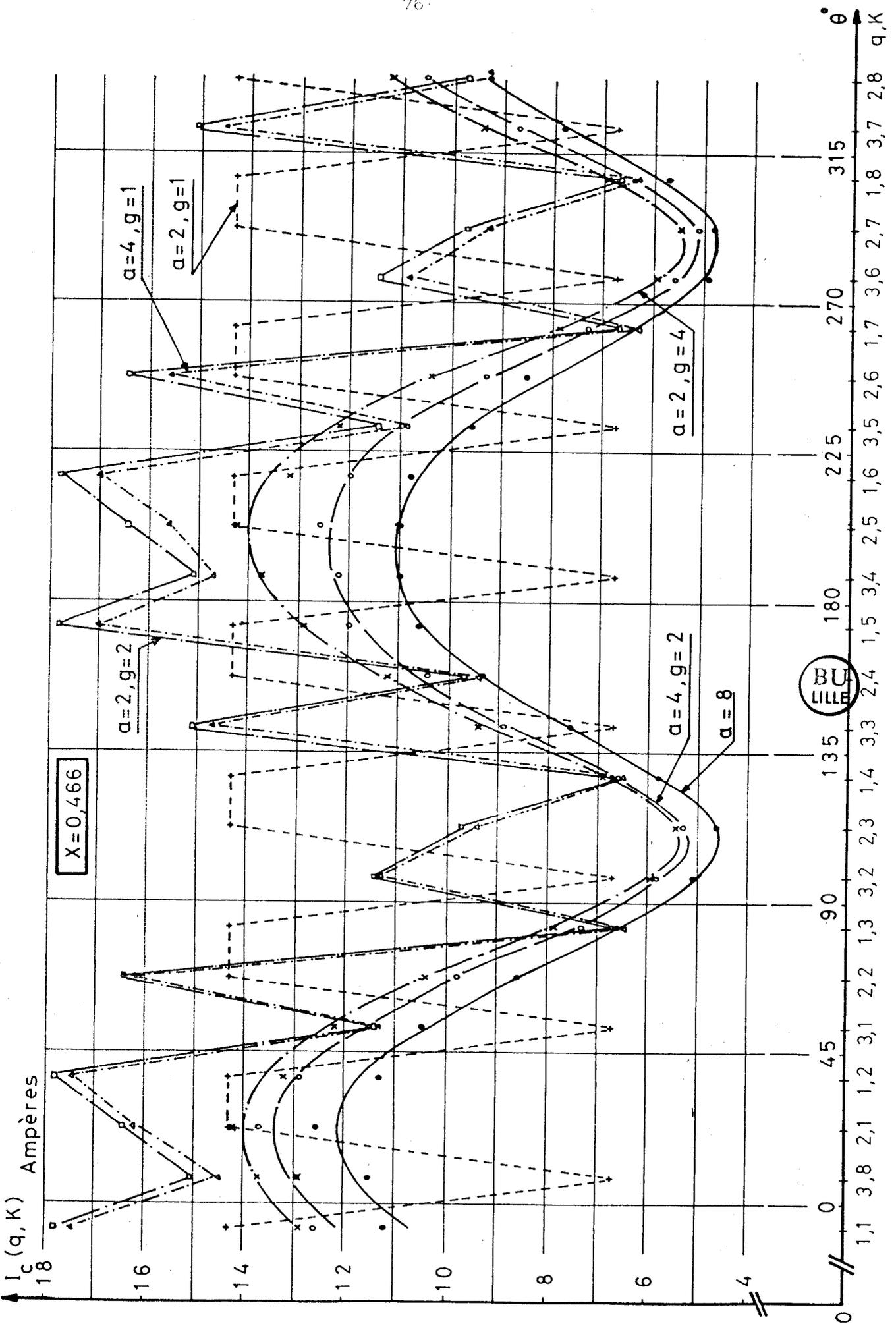


Figure V.9



Pour $a=2$, quel que soit g , les courants de circulation doivent être égaux dans les circuits en parallèle.

- . Si $g=1$, on a le même courant $I_c(q)$ dans les deux voies en parallèle,
- . Si $g=2$, $I_c(q,1 \text{ ou } 2) = I_c(q,5 \text{ ou } 6)$; $I_c(q,3 \text{ ou } 4) = I_c(q,7 \text{ ou } 8)$,
- . Si $g=4$, $I_c(q,1) = I_c(q,5)$, ..., $I_c(q,4) = I_c(q,8)$.

Pour $a > 2$, de façon générale, l'observation du tableau V.5 montre que, à x et J donnés, les courants de circulation diffèrent d'une dérivation à une autre. Mais néanmoins, on peut remarquer que l'on a approximativement, égalité des courants de circulation deux à deux. Par exemple, pour

- . $a=8$, $I_c(q,1) \neq I_c(q,5)$, ..., $I_c(q,4) \neq I_c(q,8)$,
- . $a=4, g=1$, $I_c(q,1 \text{ ou } 2) \neq I_c(q,5 \text{ ou } 6)$, $I_c(q,3 \text{ ou } 4) \neq I_c(q,7 \text{ ou } 8)$,
- . $a=4, g=2$, $I_c(q,1) \neq I_c(q,5)$, ..., $I_c(q,4) \neq I_c(q,8)$.

Ces égalités seraient probablement strictes pour la phase du bobinage statorique qui admettrait comme axe de symétrie l'axe magnétique et si les couplages des enroulements de cette phase étaient également symétriques par rapport à cet axe.

Si néanmoins, nous acceptons ces égalités, les couplages $a=8$; $a=4, g=2$ et $a=2, g=4$ sont équivalents aux circuits de la figure V.10-a et les couplages $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ sont équivalents aux circuits de la figure V.10-b. La figure V.10-c rappelle le circuit correspondant au couplage $a=2, g=1$ relatif à la phase 1.

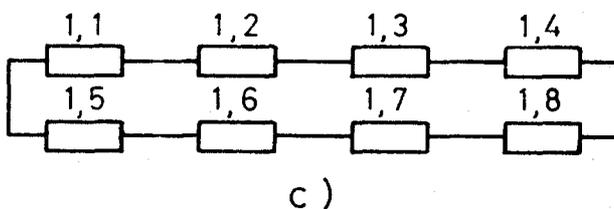
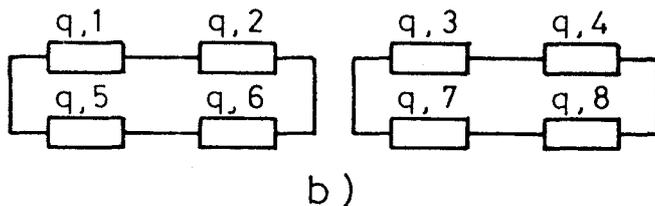
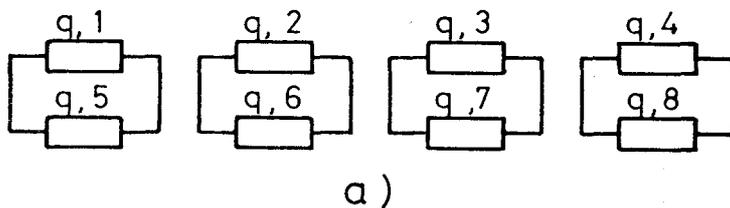


Figure V.10

Toujours pour $a > 2$, le tableau V.5 montre que, numériquement, la loi des noeuds n'est pas vérifiée. Les courants de circulation des différentes dérivations ne sont pas en phase.

II.4. Les réactances limitant les courants de circulation

Pour chaque enroulement (q,k) , nous avons mesuré les tensions à vide $E(q,k)$ puis après couplage $E_r(q,k)$, ainsi que les courants de circulation $I_c(q,k)$. Nous avons alors calculé les quantités

$$X_c(q,k) = \frac{|E(q,k) - E_r(q,k)|}{I_c(q,k)}$$

Si l'on néglige le déphasage entre les tensions $E(q,k)$ et $E_r(q,k)$ et les résistances des enroulements, la quantité $X_c(q,k)$ représente la réactance de l'enroulement (q,k) limitant les courants de circulation $I_c(q,k)$.

Les résultats de ces calculs, pour les différentes valeurs de x et pour les divers couplages, montrent que les réactances $X_c(q,k)$,

- . pour un couplage et un enroulement (q,k) donnés, sont indépendantes du décentrement relatif x ,
- . pour un couplage donné, varient d'un enroulement à l'autre,
- . pour un enroulement (q,k) donné, varient d'un couplage à l'autre.

Le tableau V.6 de l'annexe et les courbes de la figure V.11 montrent l'évolution des réactances $X_c(q,k)$ quand on passe d'un couplage à l'autre.

L'examen de ces courbes montrent que :

- . les réactances $X_c(q,k)$ sont pratiquement les mêmes pour les couplages $a=4, g=2$ et $a=2, g=4$, d'une part et $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ d'autre part,
- . c'est le couplage $a=8$ qui donne à chacun des enroulements (q,k) la réactance la plus forte. Viennent ensuite les couplages $a=4, g=2$, et $a=2, g=4$, puis les couplages $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$. C'est le couplage $a=2, g=1$ qui donne les réactances $X_c(q,k)$ les plus faibles.
- . excepté pour $a=2, g=1$, pour tous les autres couplages, la réactance la plus faible correspond aux deux enroulements dont les centres sont sur une droite proche de la perpendiculaire à l'axe magnétique. Ceci est normal car, à 90° de l'axe magnétique, $E_r(q,k)=E(q,k)$. Pour $a=2, g=1$, cette droite n'est inclinée que de 60° par rapport à l'axe magnétique.

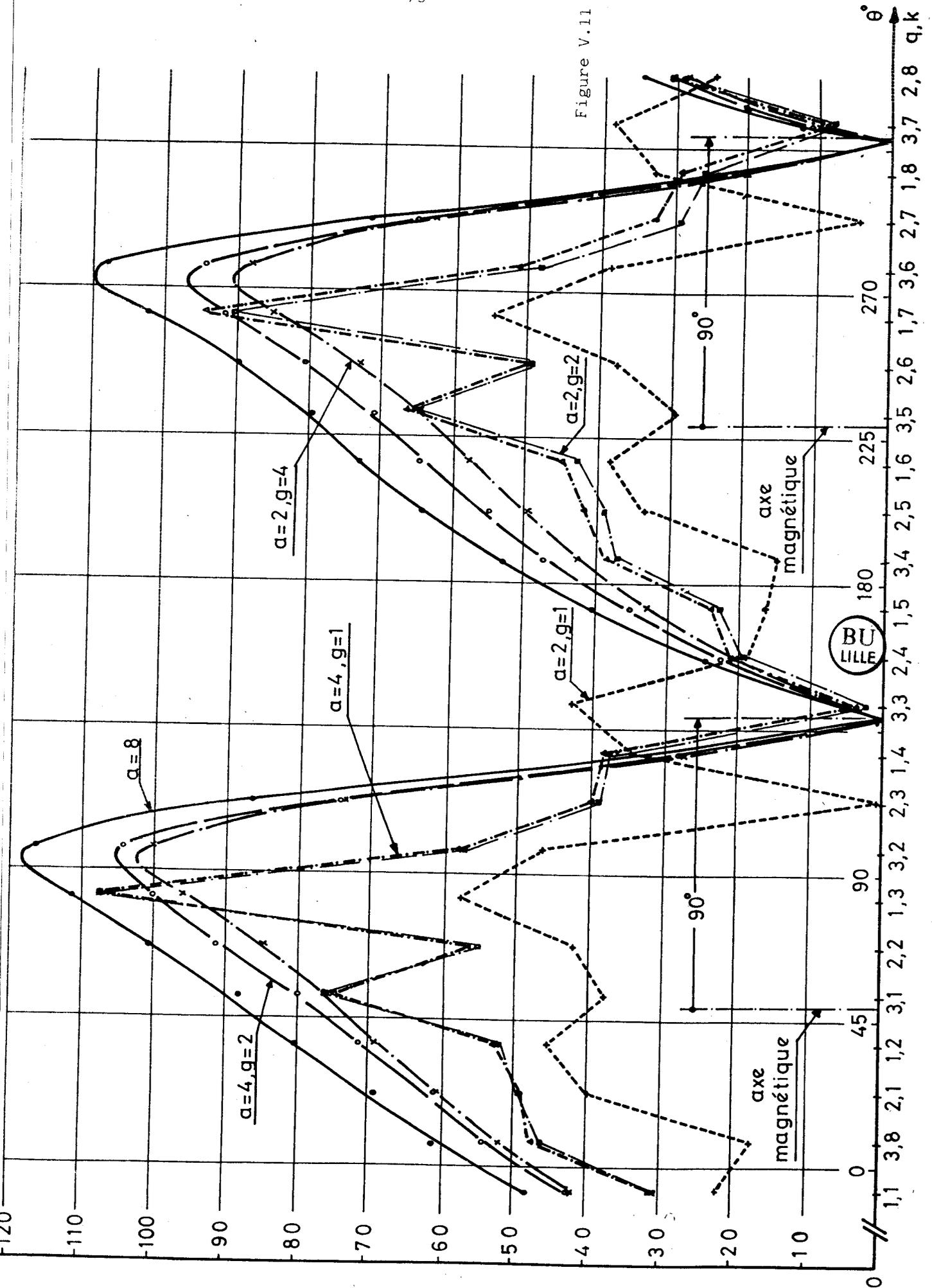


Figure V.11

. suivant le couplage, la valeur maximale de $X_c(q,k)$ correspond aux enroulements dont les centres sont décalés de 30° ou 45° par rapport à l'axe magnétique.

Remarque :

Il ne se dégage pas, du tableau V.6, de loi montrant, à couplage donné, comment passer de la réactance d'un enroulement à celle d'un autre enroulement, et, pour un enroulement donné, comment varie sa réactance en fonction du couplage. C'est la rotation de l'axe magnétique qui masque ces lois.

II.5. Remarques

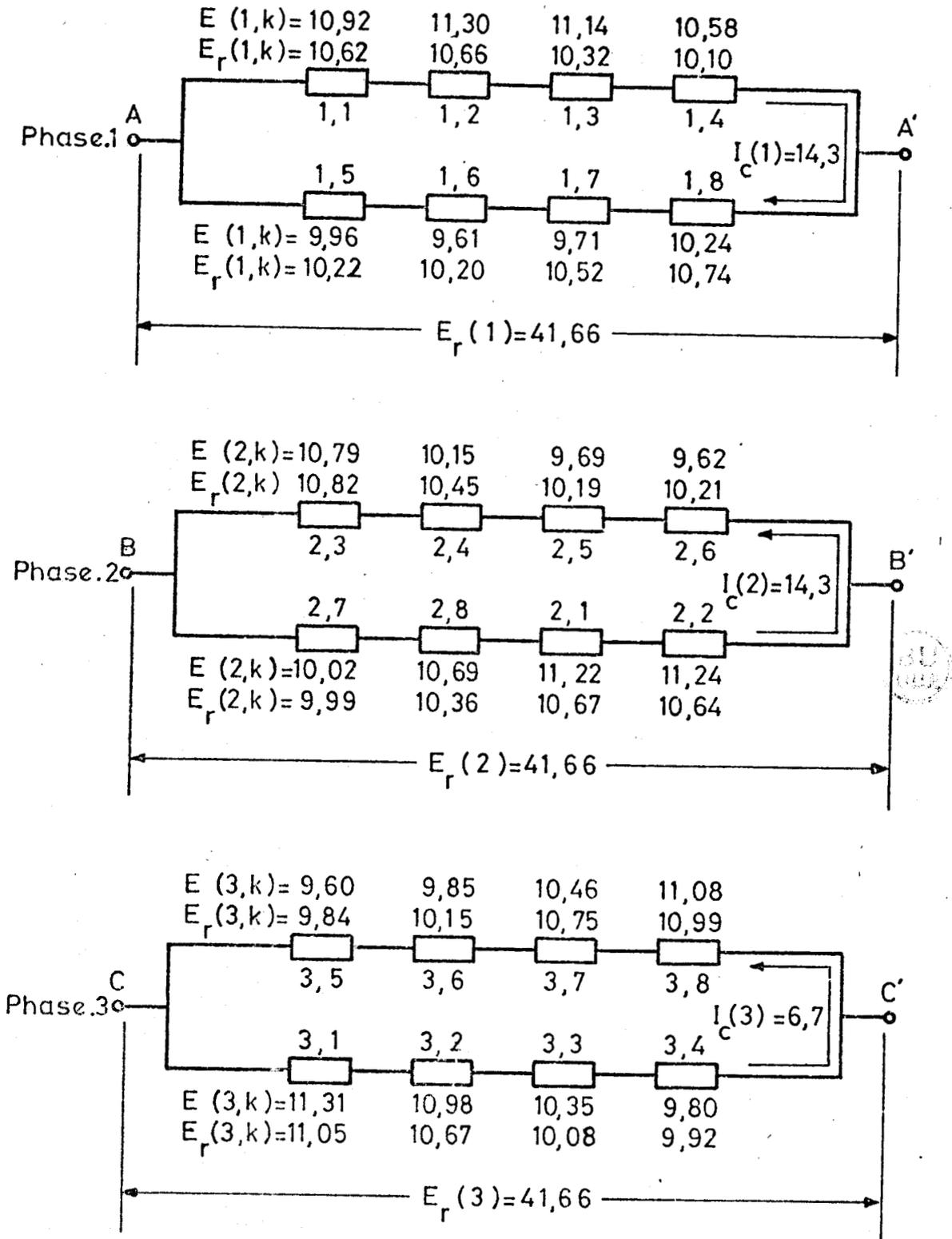
II.5.1. Les forces magnétomotrices de circulation

En plus de la valeur des courants de circulation, on peut déduire de la mesure des forces électromotrices à vide, et des tensions lorsque ces courants existent, les sens de ceux-ci. On peut ainsi avoir une idée de la forme d'onde de la force magnétomotrice créée par chaque phase et de la force magnétomotrice résultante.

Par exemple, considérons le couplage caractérisé par $a=2$, $g=1$ et utilisons les valeurs numériques relevées pour un décentrement relatif $x=0,466$.

La figure V.12 donne, pour chaque phase q la tension $E_r(q)$, et pour chaque enroulement (q,k) , la force électromotrice que l'on avait à vide $E(q,k)$, puis après couplage, les tensions $E_r(q,k)$ et les courants $I_c(q,k)$. Elle précise également les sens des courants de circulation en supposant qu'ils sont dirigés vers la droite, si le long d'une voie $\Sigma E(q,k)$ est supérieur à $E_r(q)$, et vers la gauche dans le cas contraire.

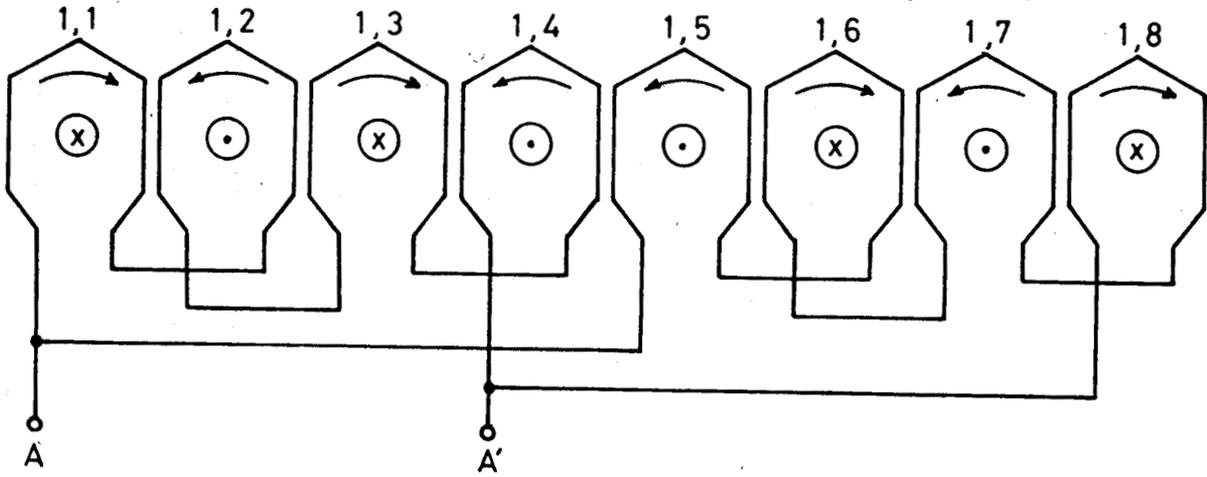
La figure V.13 permet d'obtenir, à partir du schéma de bobinage et des sens des courants de circulation, la répartition de la force magnétomotrice le long de l'entrefer pour chacune des phases. Pour chacune des phases, les schémas a, donnent, par des points (•) ou des croix (x) le sens de la force magnétomotrice créée par les courants de circulation. Au schéma a', relatif à la phase 1, nous avons tracé à la constante mn près, la force magnétomotrice le long de l'entrefer $\xi_c(1,k)$ de chaque enroulement en supposant qu'elle est proportionnelle à la valeur efficace du courant de circulation $I_c(1)$ et à répartition rectangulaire. Si $mnI_c(1)$ est le



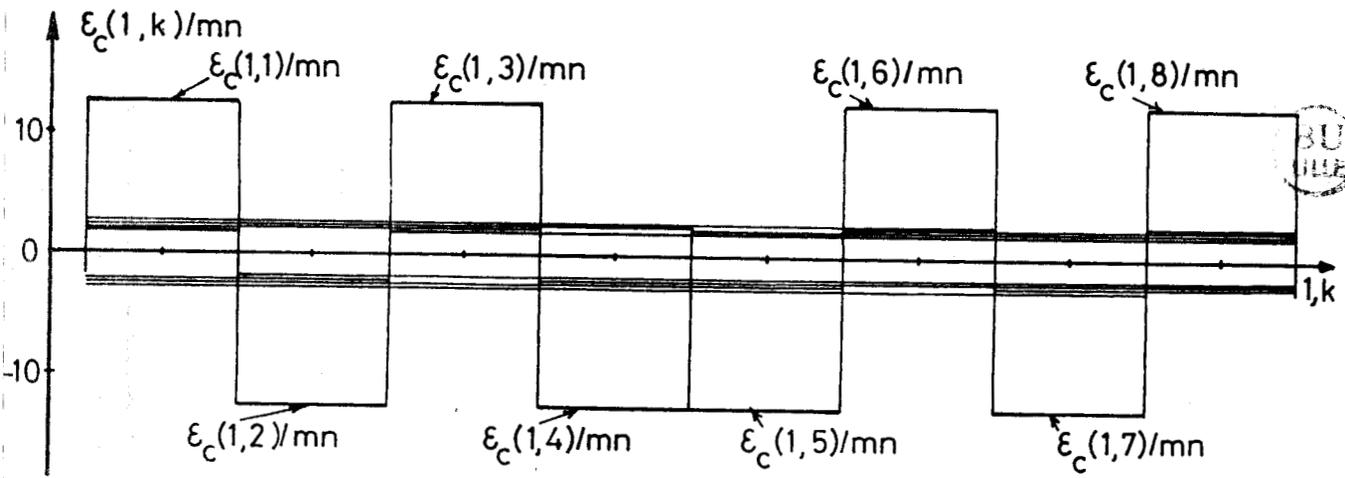
$E(q,k)$, $E_r(q,k)$ et $E_r(q)$ sont en Volt et $I_c(q)$ sont en Ampère

Figure V.12

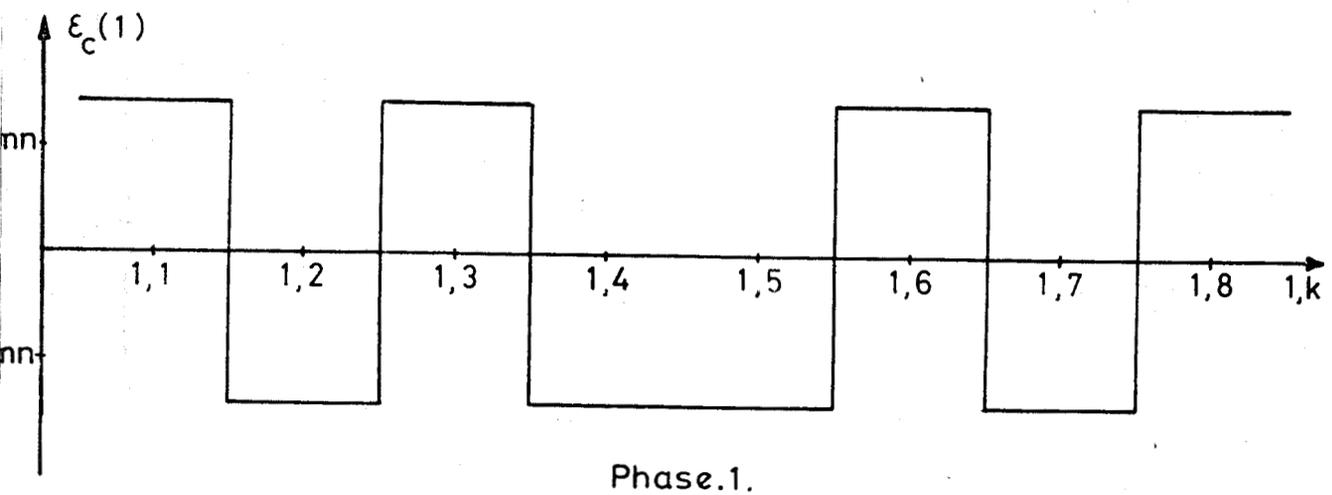
a)

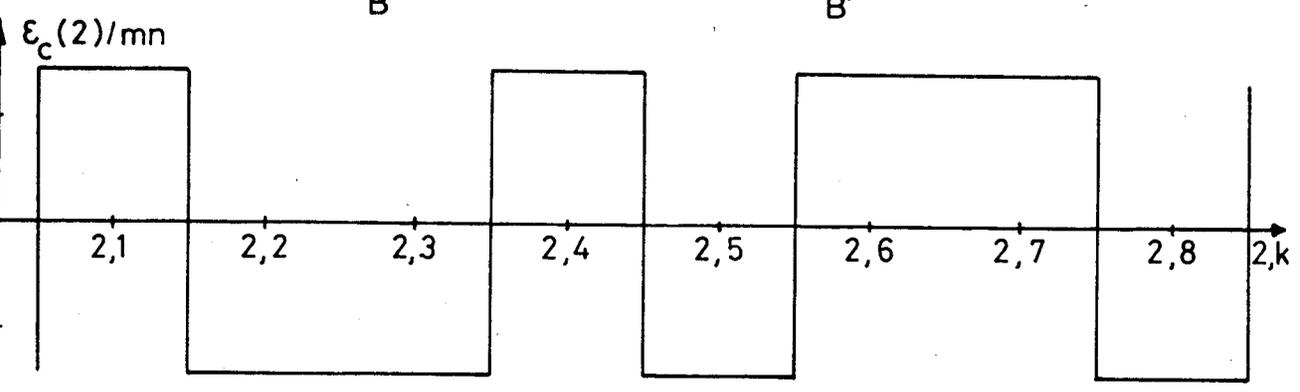
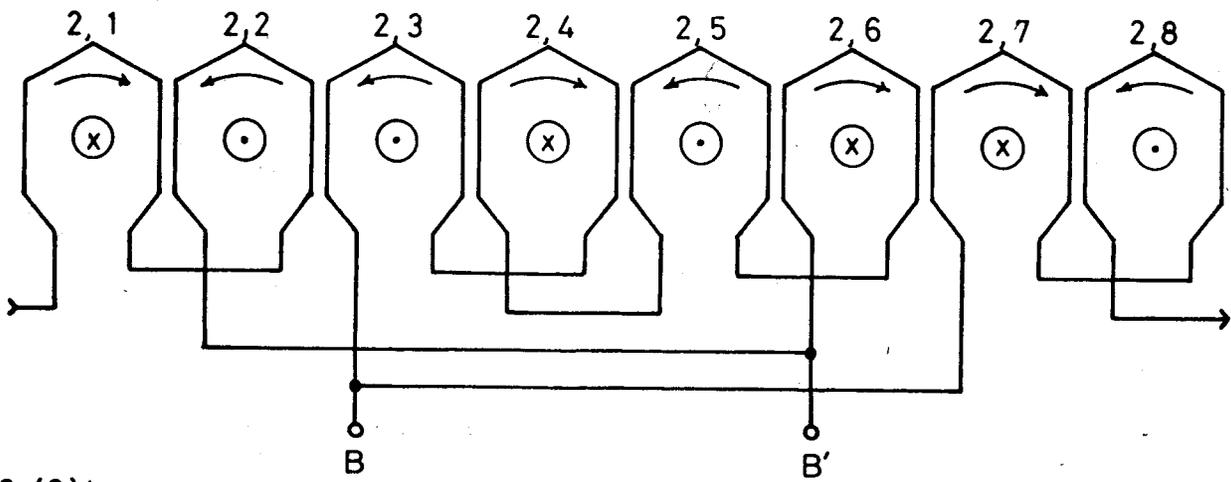


a')

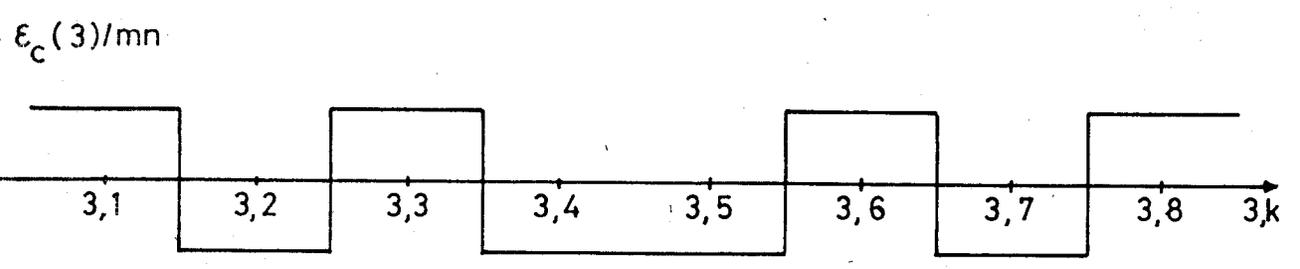
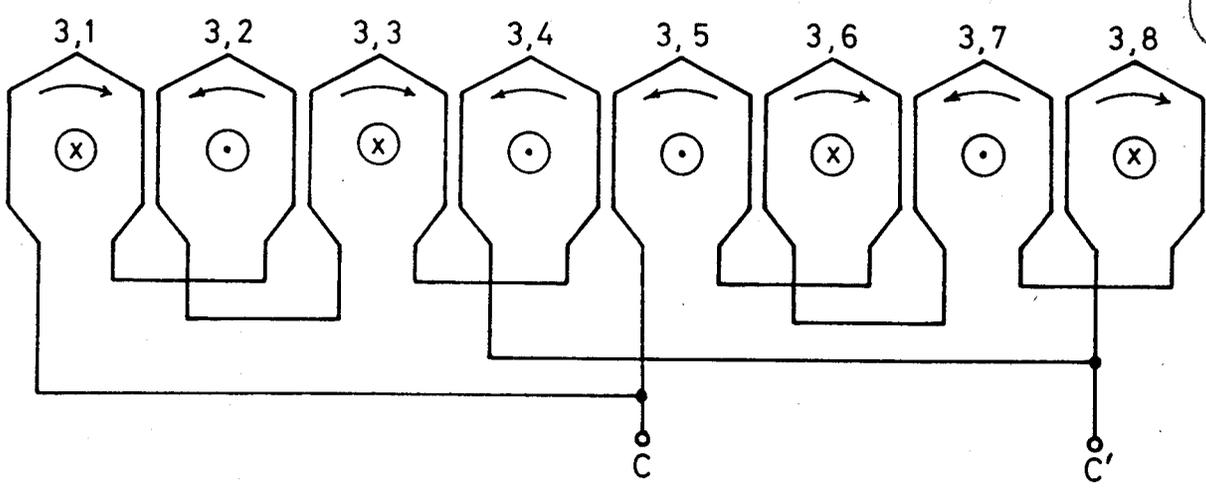


b)





Phase. 2 .



Phase. 3 .

Figure V.13

nombre d'ampères-tours de chacun des enroulements, l'amplitude positive vaut :

$$\frac{2n - \frac{n}{4}}{2\pi} mnI_c(1) = \frac{7}{8} mnI_c(1) = 12,51 mn,$$

et l'amplitude négative

$$- \frac{\frac{n}{4}}{2\pi} mnI_c(1) = - \frac{1}{8} mn I_c(1) = - 1,79mn$$

En faisant la somme des forces magnétomotrices $\xi_c(1,K)$, on trouve (schéma b) la force magnétomotrice de la phase 1, $\xi_c(1)$ d'amplitude $mnI_c(1)$, soit 14,3mn. Aux schémas relatifs aux phases 2 et 3 nous avons tracé directement les courbes $\xi_c(2)/mn$ d'amplitude 14,3 et $\xi_c(3)/mn$ d'amplitude 6,7.

Les forces magnétomotrices $\xi_c(q)$ sont d'axe fixe et présentent six polarités. De façon générale, pour une machine à $2p$ pôles, on trouverait $(2p-2)$ polarités.

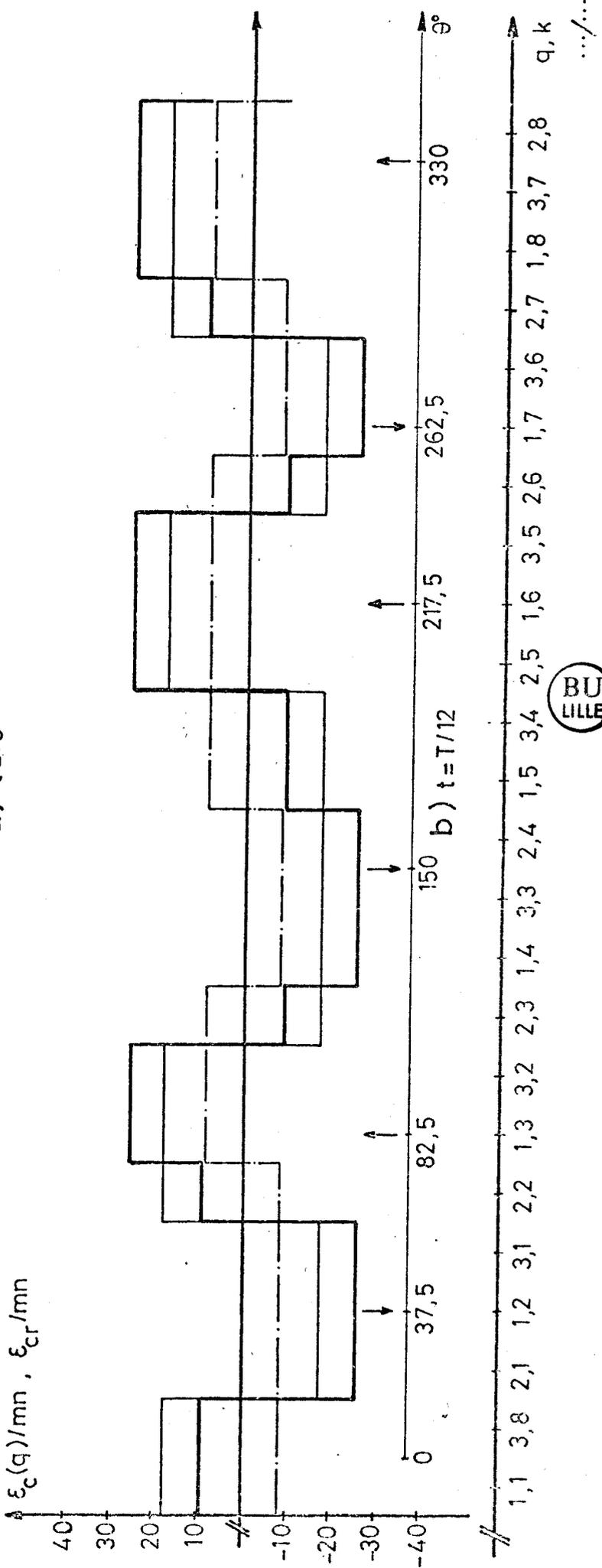
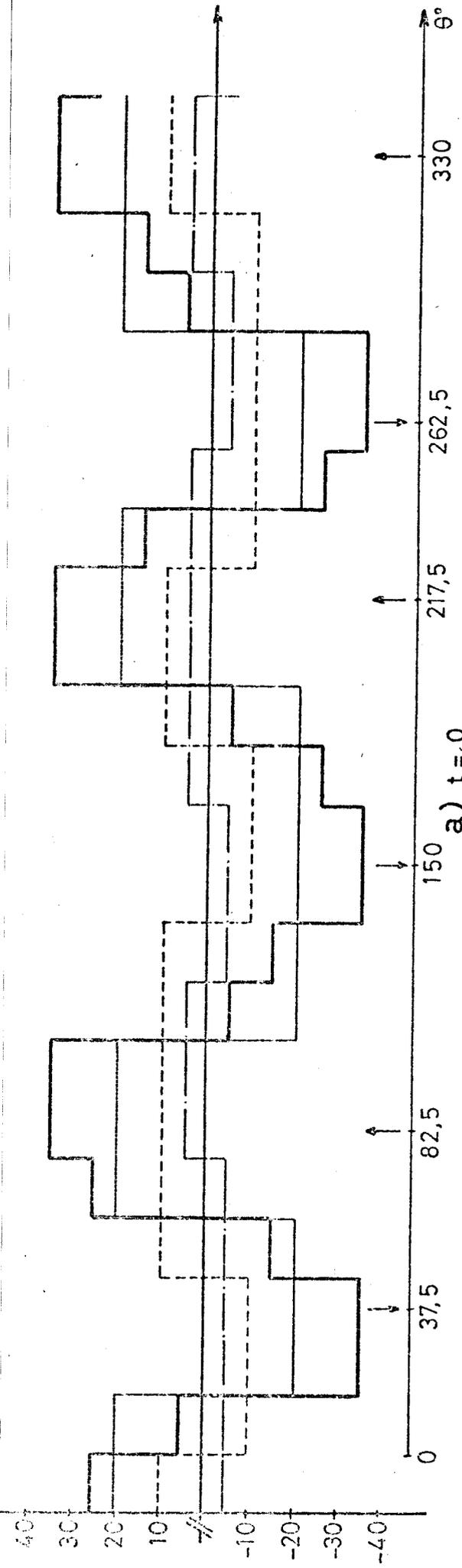
Si l'on suppose les courants de circulation des trois phases fonctions sinusoïdales du temps, déphasés régulièrement de $2\pi/3$ et de la forme

$$\begin{aligned} i_c(1) &= \sqrt{2} I_c(1) \cos \omega t = 20,22 \cos \omega t \\ i_c(2) &= \sqrt{2} I_c(2) \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = 20,22 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_c(3) &= \sqrt{2} I_c(3) \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = 9,48 \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{aligned}$$

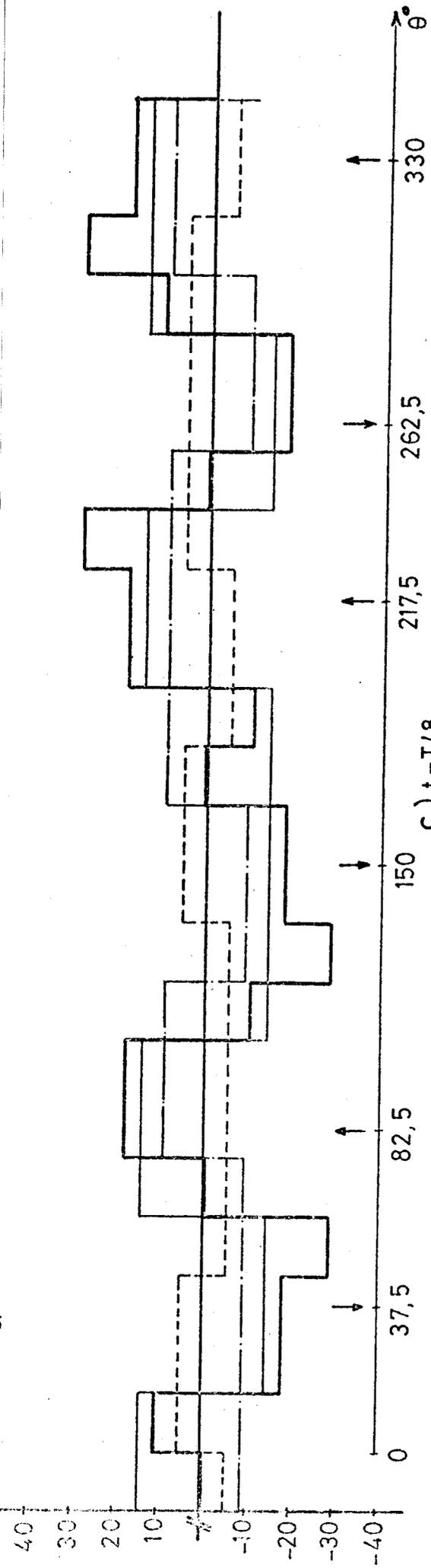
on peut alors déterminer la force magnétomotrice résultante ξ_{cr} le long de l'entrefer, due aux trois phases et à divers instants t . La figure V.14 représente à la constante mn près, les forces magnétomotrices $\xi_c(1)$, $\xi_c(2)$, $\xi_c(3)$ et leur résultante ξ_{cr} aux instants $t=0, T/12, T/8, T/6, T/5, T/3, 3T/8, 5T/12$ et $T/2$.

On constate que ξ_{cr} est une force magnétomotrice qui présente également, quel que soit t , six polarités.

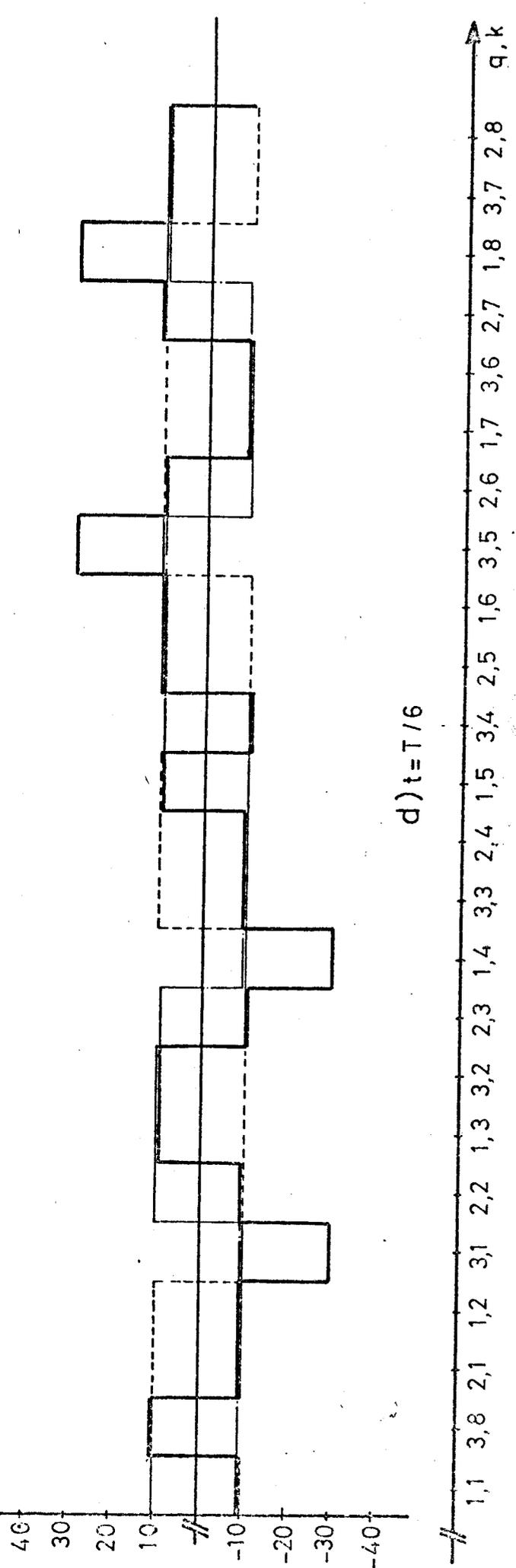
La force magnétomotrice ξ_{cr} n'est ni tournante, ni d'axe fixe. Si l'on considère les axes milieu des alternances positives et négatives, ξ_{cr} ne comporte que trois axes et les polarités sont deux à deux diamétralement opposées. Par exemple aux instants $t=0, T/12; T/8$ et $T/2$ les trois axes sont caractérisés par $\theta = 37^\circ,5 ; 82^\circ,5$ et 150° . Aux instants $T/4, T/3$ et $3T/8$ ils sont situés en $\theta = 22^\circ,5 ; 90^\circ$ et $157^\circ,5$. Entre 0 et $T/2$,



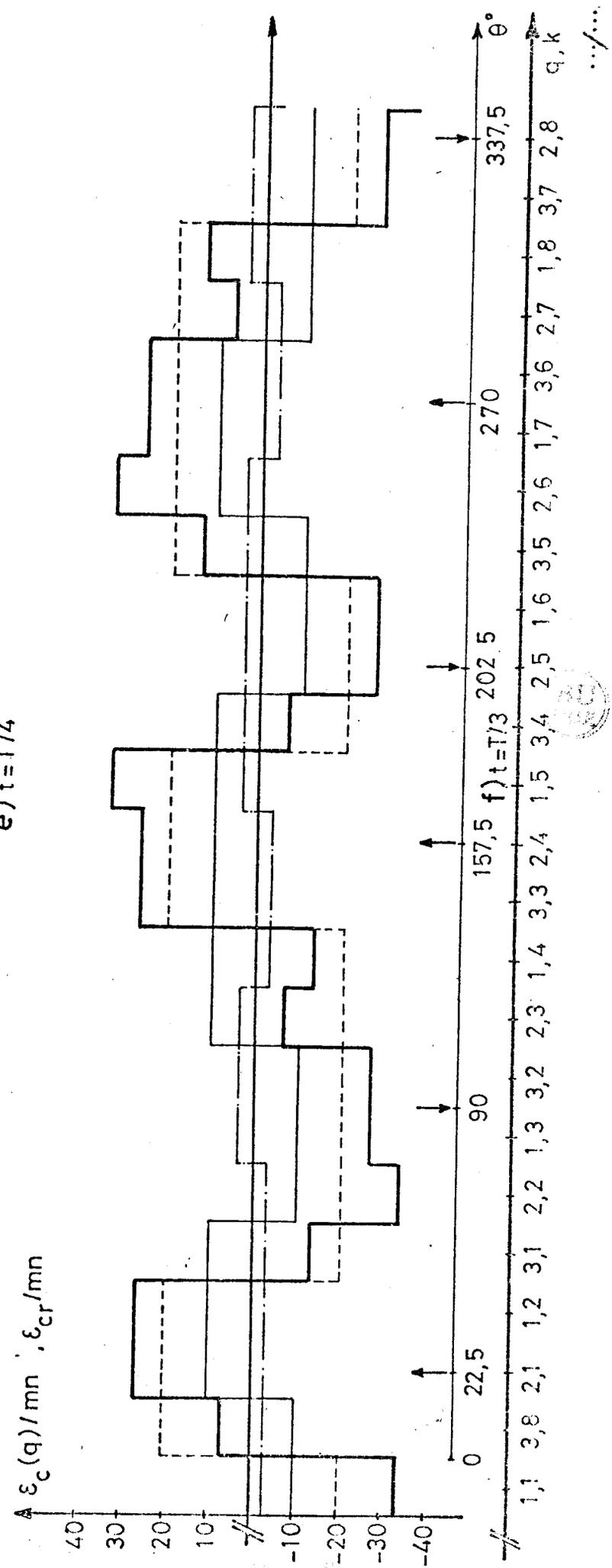
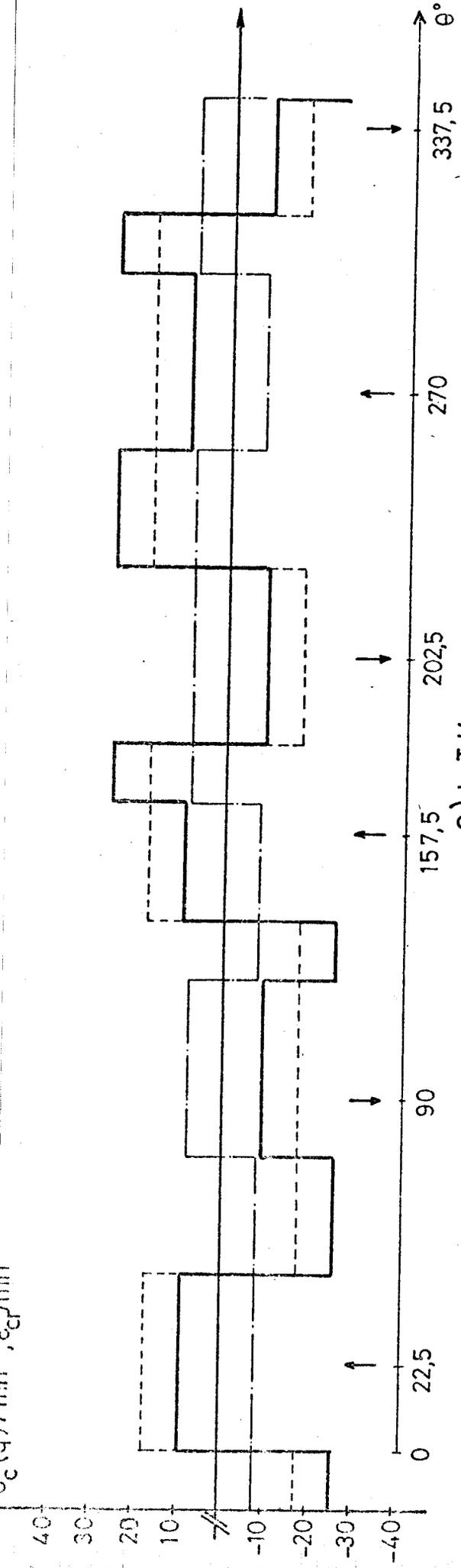
1,1 3,8 2,1 1,2 3,1 2,2 1,3 3,2 2,3 1,4 3,3 2,4 1,5 3,4 2,5 1,6 3,5 2,6 1,7 3,6 2,7 1,8 3,7 2,8 q, k
.../...



$\Delta \epsilon_c(q)/mn ; \epsilon_{cr}/mn$



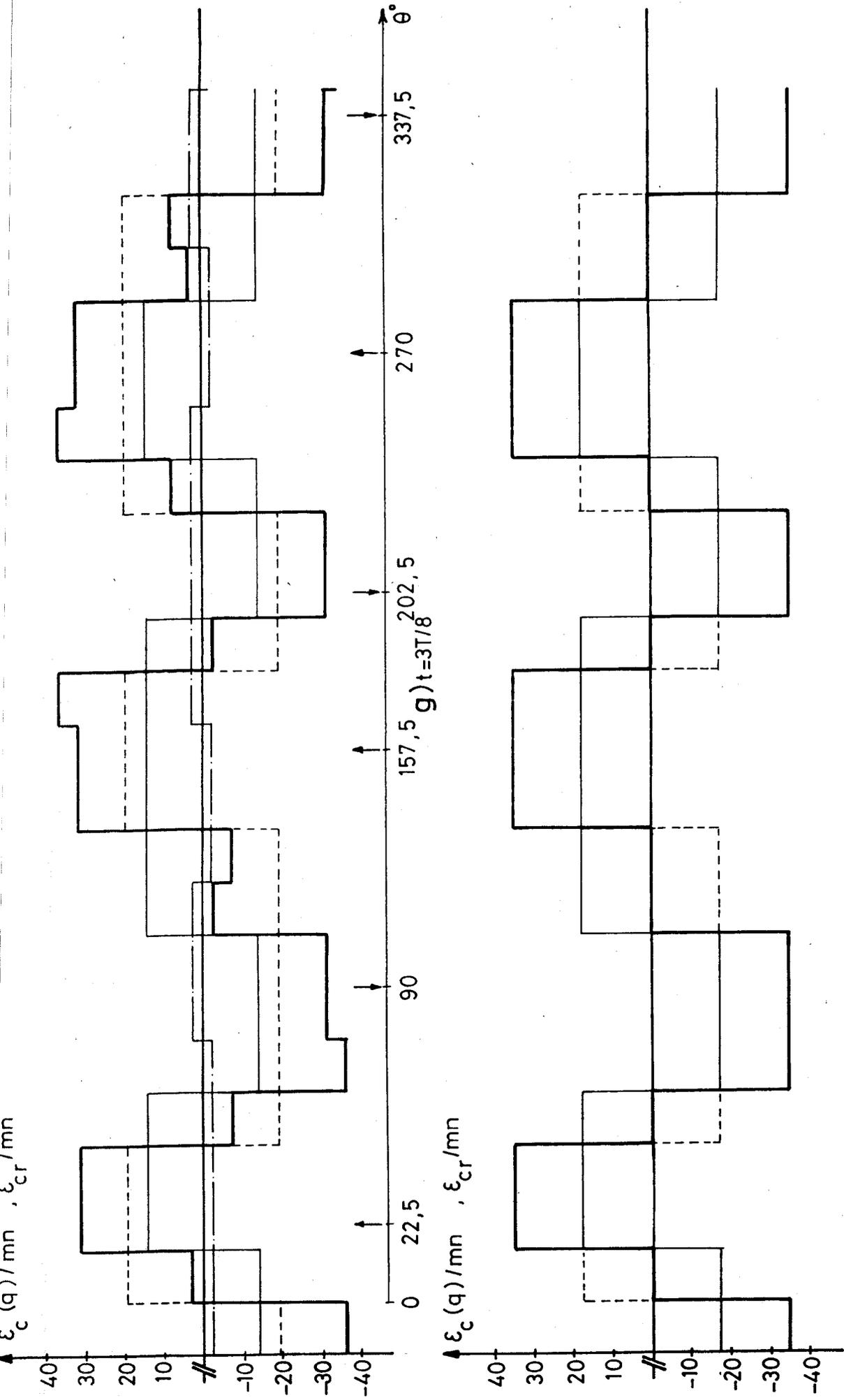
.../...



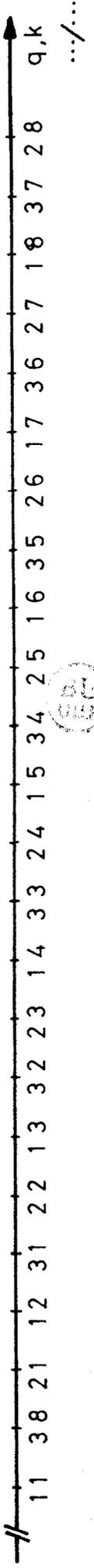
$\epsilon_c(q)/mn, \epsilon_{cr}/mn$

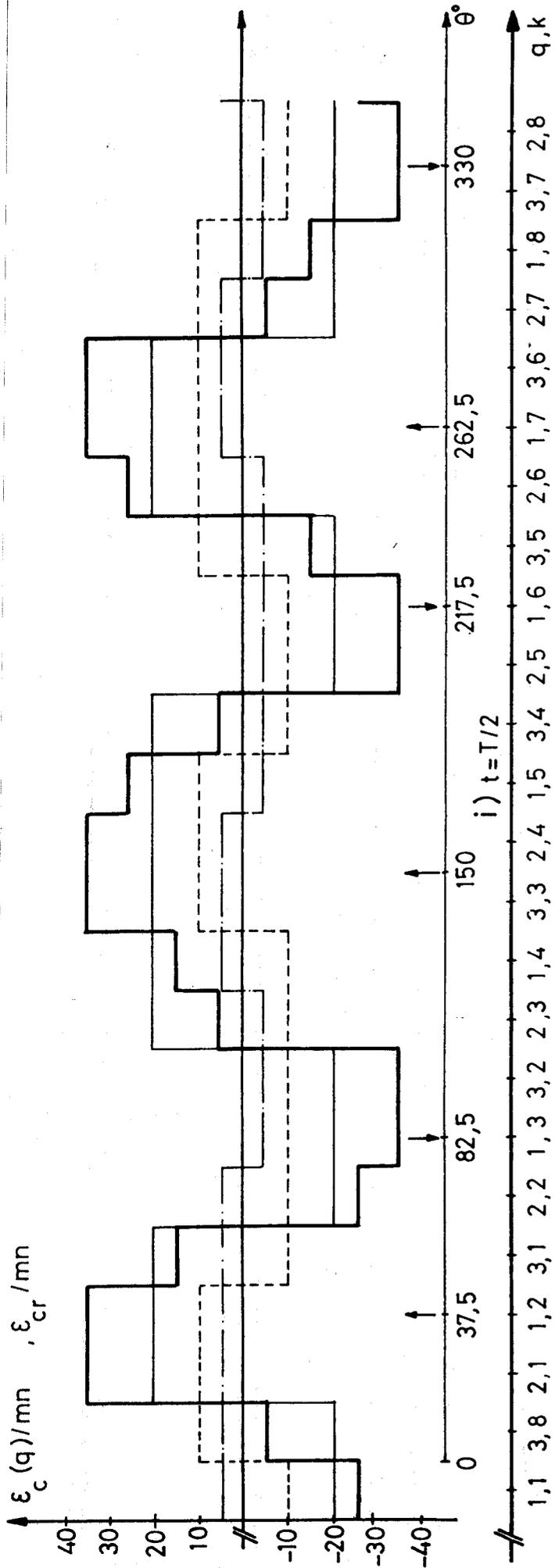
$\epsilon_c(q)/mn, \epsilon_{cr}/mn$

.../...



h) $t=5T/12$





Remarque:

Pour tous les schemas, $\epsilon_c(1)/mn$ sont en _____
 $\epsilon_c(2)/mn$ " " " " _____
 $\epsilon_c(3)/mn$ " " " " _____
 ϵ_{cr}/mn " " " " _____

Figure V.14



il semble que ce soit aux instants proches de $T/6$ et $5T/12$ que se produit la modification de position de ces axes. Par ailleurs, il semble que ce soit aux mêmes instants que les polarités de ξ_{cr} changent de signe. Par exemple, pour $0 < t < T/6$, la première polarité est axée en $\theta = 37^\circ,5$, et est négative. Pour $T/6 < t < 5T/12$, elle est axée en $\theta = 22^\circ,5$ et est positive.

On trouve des résultats semblables en considérant les autres couplages des enroulements statoriques.

II.5.2. Particularités de certains enroulements

Reprenons l'exemple du couplage $a=2$, $g=1$. Sur le schéma relatif à la phase 3 de la figure V.12, les enroulements (3,4) et (3,8) ont un comportement particulier.

Bien que se trouvant dans la voie où $\sum_{k=1}^4 E(3,k)$ est supérieur à $E_r(3)$, l'enroulement (3,4) voit sa tension $E_r(3,4)$ devenir plus grande que sa force électromotrice à vide $E(3,4)$.

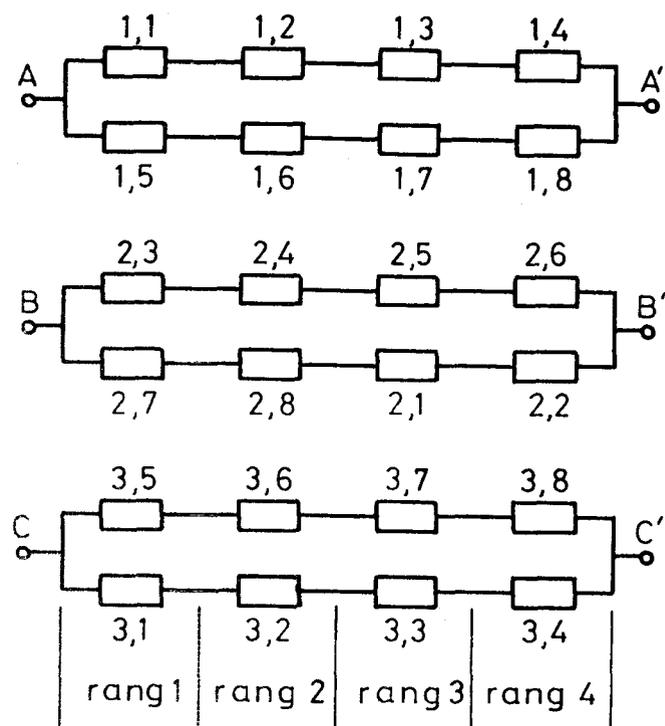
Inversement pour l'enroulement (3,8) qui, bien que se trouvant dans la voie où $\sum_{k=5}^8 E(3,k)$ est inférieur à $E_r(3)$, voit sa tension $E_r(3,8)$ devenir plus petite que sa force électromotrice à vide $E(3,8)$.

Si l'on observe les courbes de la figure V.14, on s'aperçoit que seuls les enroulements (3,4) et (3,8) présentent la particularité suivante. A tout instant et face aux enroulements (3,4) et (3,8), la force magnétomotrice $\xi_c(3)$ de la phase 3 (à laquelle appartiennent les enroulements (3,4) et (3,8)) est toujours opposée à la force magnétomotrice résultante ξ_{cr} . L'enroulement (3,4) bien que débitant du courant voit sa tension augmenter, et l'enroulement (3,8) bien que recevant du courant voit sa tension diminuer.

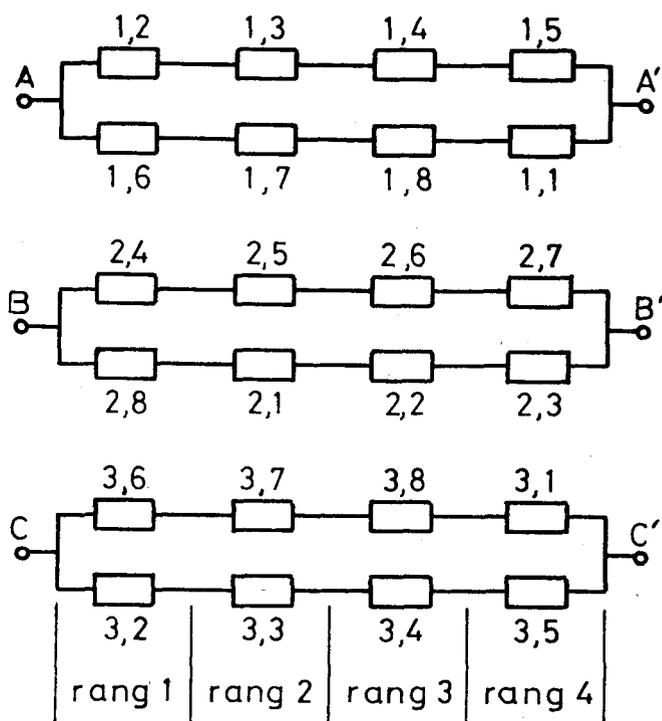
L'observation des autres couplages conduit à des résultats semblables.

II.5.3. Permutation des enroulements de chaque phase

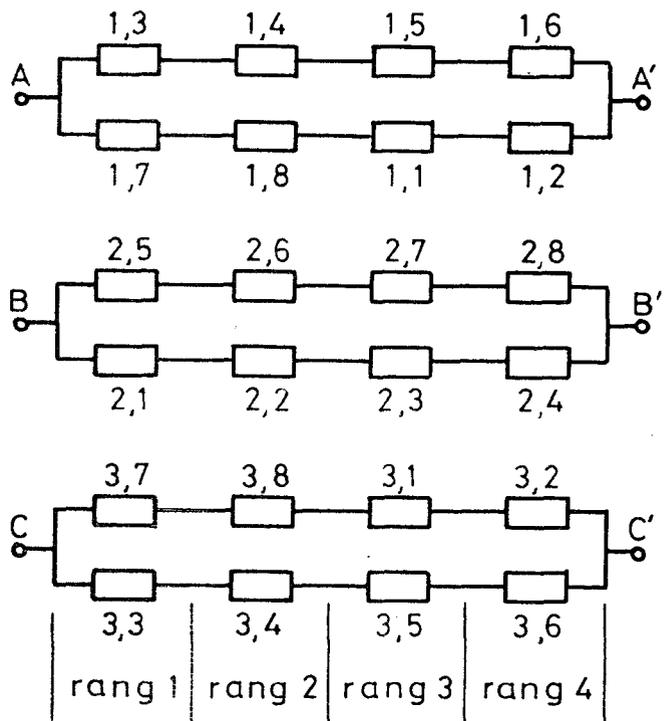
De nombreux autres essais ont été effectués après permutation des enroulements de chaque phase. Cela n'est possible d'ailleurs que pour les couplages $a=4$, $g=1$; $a=2$, $g=1$ et $a=2$, $g=2$. Nous ne reproduirons ici que les résultats relatifs au couplage $a=2$, $g=1$. Comme on a vu que



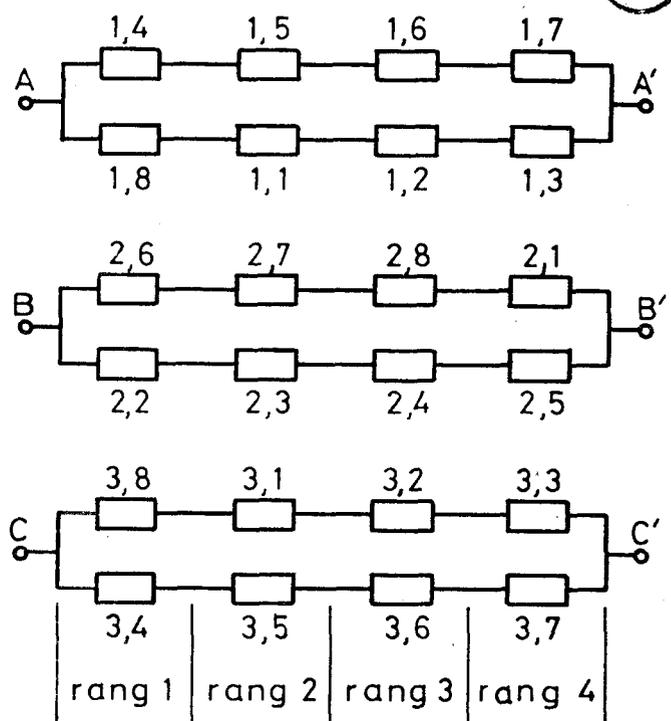
a)



b)



c)



d)

Figure V.15

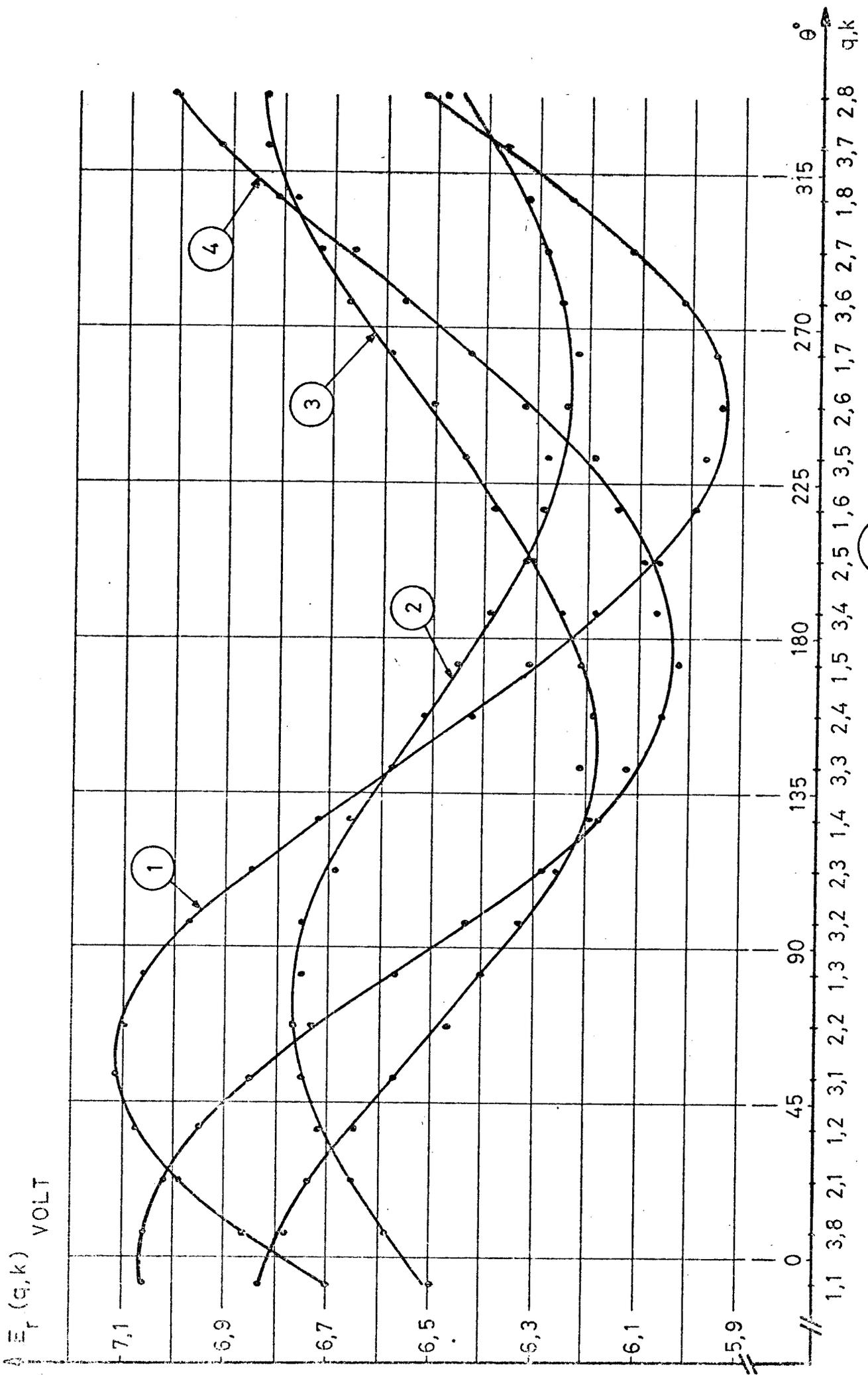


Figure V.16

la réactance $X_c(q,k)$ d'un enroulement était indépendante du décentrement relatif x nous n'avons fait qu'une mesure pour x égal à 0,666.

La figure V.15 donne les quatre permutations possibles, le schéma a, correspond d'ailleurs à la disposition déjà étudiée.

Les mesures de $E_r(q,k)$, de $E_r(q)$ et de $I_c(q)$ ainsi que les valeurs calculées de $X_c(q,k)$ sont reportées au tableau V.7 de l'annexe. Nous avons également rappelé dans ce tableau les valeurs relatives au schéma a.

On constate que les tensions aux bornes des phases $E_r(q)$ restent les mêmes quelle que soit la permutation. Mais, pour un enroulement (q,k) donné la réactance $X_c(q,k)$ varie d'une permutation à l'autre.

Sur la figure V.16 nous avons reporté au droit de chaque centre d'enroulement (q,k) , les quatre tensions $E_r(q,k)$ obtenues avec les quatre permutations. A partir de cet ensemble de points, on peut tracer quatre courbes numérotées de 1 à 4.

Quelle que soit la permutation, on remarque alors que les tensions $E_r(q,k)$ des enroulements (q,k) occupant le rang 1 correspondent à la courbe 1 ; celles des enroulements occupant le rang 2 correspondent à la courbe 2, etc...

On obtient des résultats analogues en considérant les autres couplages.

II.5.4. Couplage partiel des enroulements de chaque phase

Pour créer les courants de circulation, il n'est pas nécessaire de coupler tous les enroulements de chacune des phases. Nous avons fait de nombreux essais en n'utilisant que la moitié des enroulements de chaque phase.

La moitié des enroulements de chaque phase étant en circuit ouvert, avec l'autre moitié on peut réaliser les couplages partiels $a=4$, $a=2, g=1$ et $a=2, g=2$, mais nous ne reproduirons ici que les résultats numériques relatifs au premier couplage.

Pour ce couplage partiel caractérisé par $a=4$, et pour un décentrement relatif $x=0,666$, nous avons tout d'abord mis les enroulements de rang k impair en parallèle et laissé en circuit ouvert ceux de rang k pair, puis, nous avons fait l'inverse. Les valeurs numériques des tensions aux bornes $E_r(q)$ et des courants de circulation $I_c(q,k)$ relatifs aux enroulements couplés, et des tensions $E'(q,k)$ aux bornes des enroulements en circuit ouvert, sont regroupées au tableau V.8 de l'annexe.

Quel que soit le groupe d'enroulements mis en parallèle et quelle que soit la phase, les tensions $E_r(q)$ sont identiques. Pour le même décentrement relatif x , ces tensions conservent la valeur que l'on avait relevée précédemment avec le couplage total $a=8$.

Mais, toujours à x donné, on voit que les courants de circulation maxima sont ici près de 2,5 fois plus intense qu'avec le couplage total $a=8$.

Pour $x = 0,666$, les courbes de la figure V.17 donnent, en fonction de θ , les forces électromotrices $E(q,k)$ mesurées aux bornes des enroulements lorsque ceux-ci sont tous en circuit ouvert (voir tableau V.1) et les tensions $E'(q,k)$. De la comparaison de ces deux courbes on déduit les deux remarques importantes suivantes :

- lorsque tous les enroulements sont en circuit ouvert l'axe magnétique est caractérisé par $\theta \neq 46^\circ,2$. La présence de courants de circulation ramène cet axe en $\theta \neq 7^\circ,5$, c'est à dire très proche de l'axe de décentrement géométrique.

On peut donc dire que lorsqu'il y a des courants de circulation, la force d'attraction magnétique radiale est pratiquement dirigée suivant l'axe du décentrement géométrique.

- en faisant abstraction de la position de l'axe magnétique, tous les enroulements situés dans la zone où l'entrefer se comporte comme si son épaisseur était réduite, voient leur tension, en circuit ouvert, diminuer de $E(q,k)$ à $E'(q,k)$. Donc dans cette zone, en tout point de l'entrefer, l'induction maximale décroît et les surfaces en regard des armatures statorique et rotorique subissent une force d'attraction plus faible, inversement pour les enroulements situés dans la zone où l'entrefer se comporte comme si son épaisseur était augmentée. Dans cette zone les tensions, les inductions maximales et la force d'attraction sont augmentées. Globalement la force d'attraction résultante est plus faible. Il faut donc s'attendre, lorsqu'il y a des courants de circulation, à une réduction de la force d'attraction magnétique radiale.

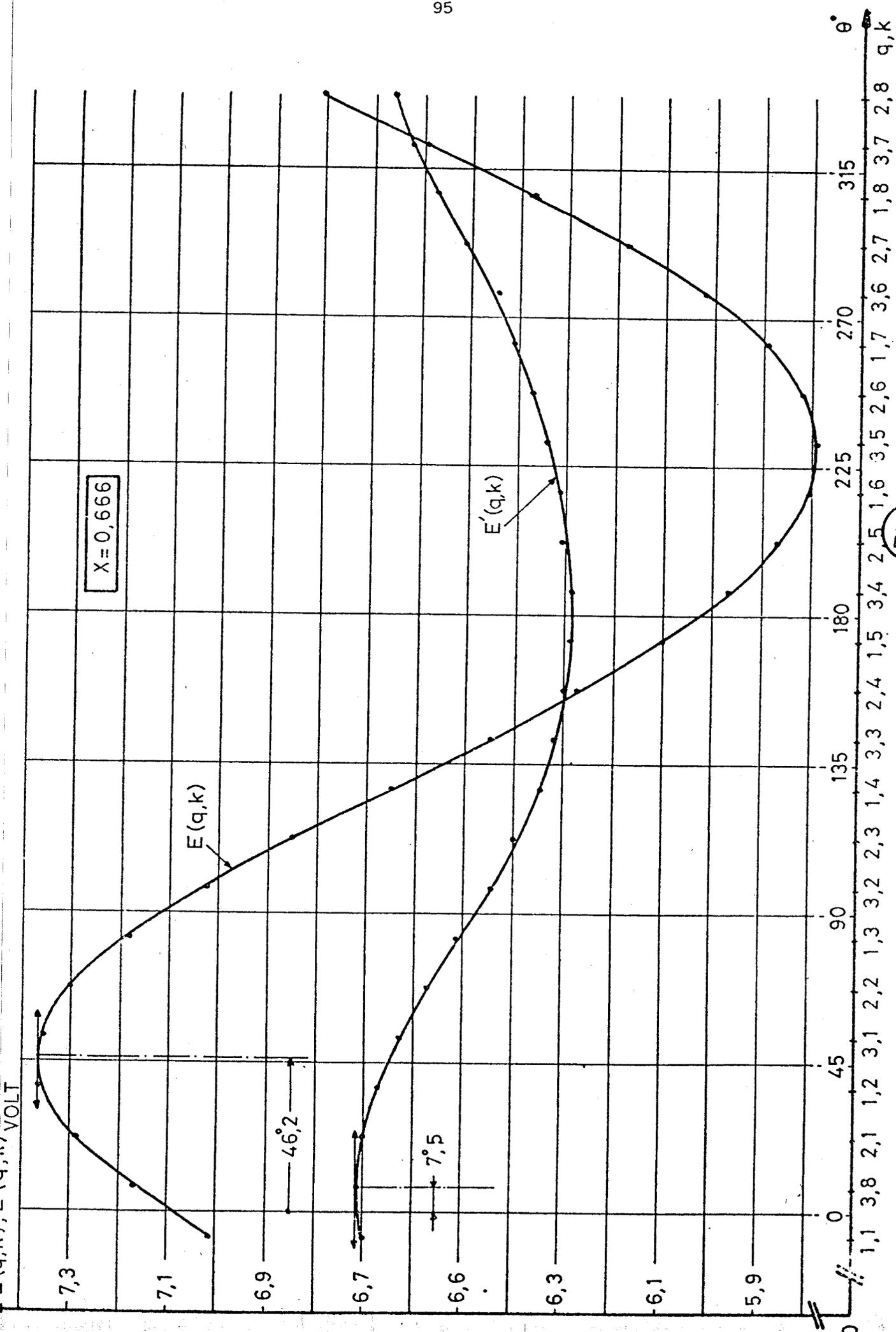


Figure V.17

Les résultats sont semblables pour le couplage partiel $a=2$, $g=2$. En particulier on a les mêmes valeurs pour les tensions $E_r(q,k)$ et $E'(q,k)$. Les courants de circulation présentent des valeurs maximales voisines.

Pour le couplage partiel $a=2$, $g=1$, l'axe magnétique, tout en se rapprochant de l'axe du décentrement géométrique, en reste néanmoins nettement distinct. La force d'attraction magnétique radiale ne sera donc pas dirigée suivant l'axe du décentrement géométrique. Par ailleurs, en fonction de θ , la courbe donnant $E'(q,k)$ présente des fluctuations autour de sa valeur moyenne, certes plus faibles que celles de la courbe $E(q,k)$ mais néanmoins très supérieures à ce que l'on avait trouvé pour les autres couplages. La force d'attraction magnétique radiale sera donc réduite mais bien moins que pour les autres couplages partiels.

. Pour avoir une réduction très nette de la force d'attraction magnétique radiale, il faut donc qu'il y ait suffisamment de voies en parallèle. Si le nombre de voies est faible, la présence de connexions équipotentielles permet de retrouver les résultats obtenus avec un nombre de voies important.

C H A P I T R E 6

MESURE DE LA FORCE MAGNETIQUE
D'ATTRACTION RADIALE ET DETERMINATION DE SA REDUCTION

Pour compléter l'étude expérimentale de l'influence du décentrement du rotor des machines synchrones multipolaires, il nous a semblé intéressant de mesurer la force d'attraction entre les deux armatures, ainsi que sa réduction lors du couplage en parallèle des enroulements de chacune des phases.

1. MESURE DE LA FORCE D'ATTRACTION MAGNETIQUE RADIALE

Nous pensions tout d'abord mesurer cette force à l'aide de jauges de contrainte disposées sur les supports de paliers. Mais la rigidité de ces supports est telle que leur déformation est pratiquement négligeable.

Nous avons donc utilisé la méthode suivante : on réalise le décentrement à l'aide du système vis-écrou qui permet de soulever le stator et on le mesure à l'aide d'un comparateur. On ne resserre pas totalement les écrous permettant la fixation du stator sur le socle. Lorsque l'on augmente le courant d'excitation, la force d'attraction stator-rotor

croît. Dès que cette force devient supérieure au poids du stator, celui-ci est attiré par le rotor. Le comparateur décèle alors son déplacement. Il faut surtout prendre la précaution de ne pas avoir un desserrage des écrous trop important, sinon on risquerait de voir le stator venir toucher le rotor.

A cause des guidages, le stator ne peut se déplacer que verticalement. On ne peut donc mesurer par cette méthode que la composante F_x suivant l'axe du décentrement de la force d'attraction magnétique radiale F . Mais il a été montré dans l'étude théorique, que la composante F_y suivant un axe perpendiculaire au décentrement était faible et même nulle si un axe polaire ou interpolaire était confondu avec l'axe du décentrement.

I.1. Variation du courant d'excitation J en fonction du décentrement relatif x à force d'attraction F donnée

Les enroulements statoriques étant en circuit ouvert, le poids du stator valant 5.300 N, nous avons augmenté progressivement le courant d'excitation et relevé sa valeur J lors du décollage du stator pour diverses valeurs du décentrement relatif x . Cet essai a été fait rotor à l'arrêt pour éviter l'influence des circuits amortisseurs et en réalisant la coïncidence successivement d'un axe polaire puis d'un axe interpolaire avec l'axe du décentrement géométrique. Les mesures sont reportées au tableau VI.1 de l'annexe, et les courbes $J(x)$ à F constant et égale à 5.300 N sont représentées à la figure VI.1.

A x donné, la courbe (2) a des ordonnées supérieures à celles de la courbe (1). Ce résultat correspond bien à l'étude théorique, où il a été montré que, pour ces positions particulières du rotor, la composante F_x égale la force F mais que cette force F est plus grande pour la première position que pour la seconde. Plus la force est faible, plus il faut augmenter le courant d'excitation pour soulever le stator.

L'écart entre ces deux courbes reste cependant faible. Néanmoins, comme les essais ultérieurs se feront avec rotation du rotor, il nous a semblé plus exact de travailler avec la courbe moyenne représentée à la figure VI.2. Les coordonnées de quelques points de cette courbe sont consignées au tableau VI.2.

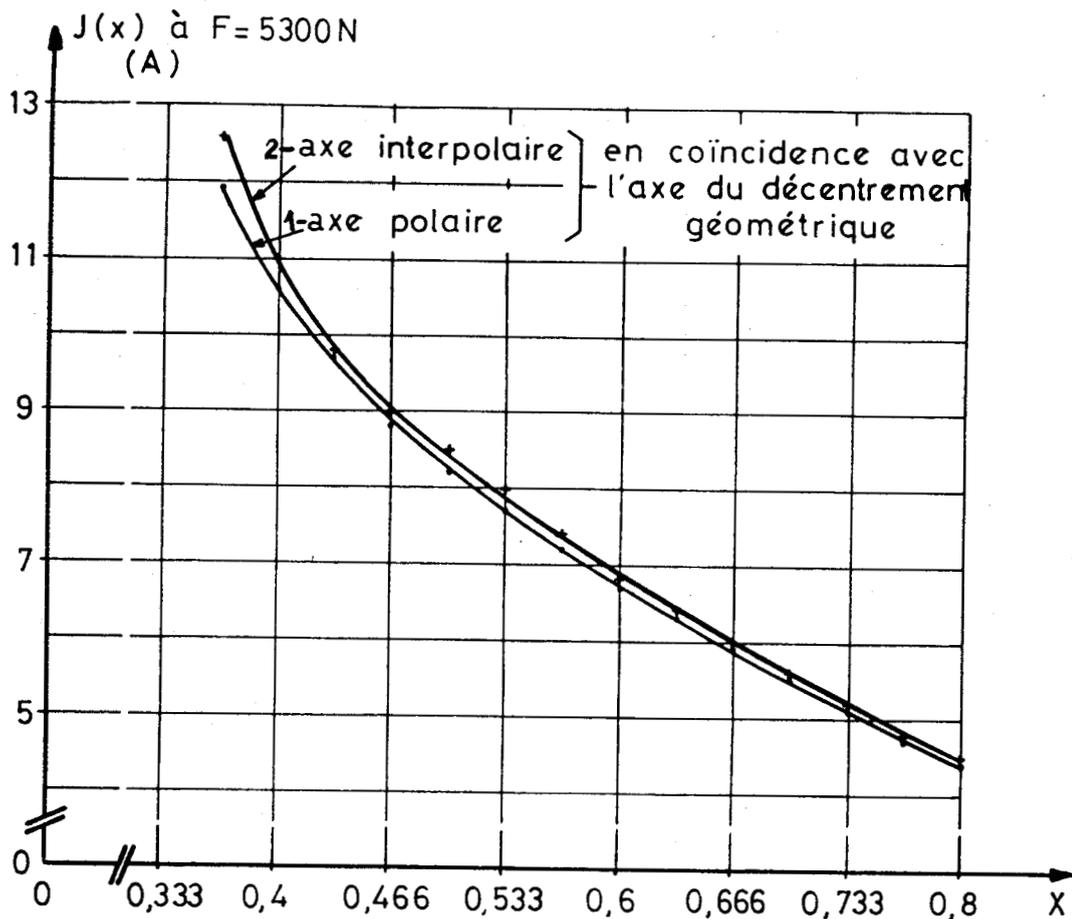


Figure VI.1

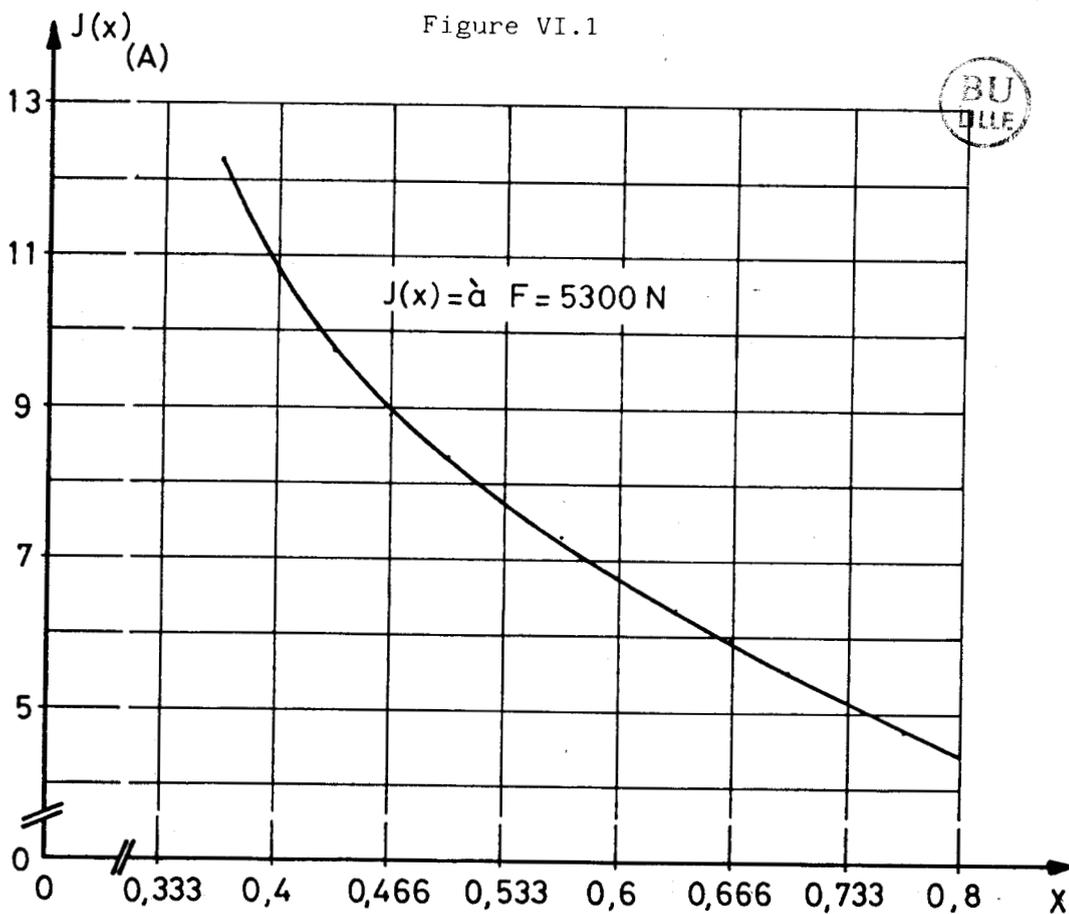


Figure VI.2

Remarque

Pour montrer l'influence de la rotation nous avons refait cet essai à la vitesse de rotation $N=750$ T/min. Par exemple, pour $x = 0,666$, à l'arrêt nous avons J compris entre 5,9 et 6 A. En rotation, le courant d'excitation nécessaire pour soulever le stator est $J=11,3A$.

Cela montre bien la rotation de l'axe magnétique, et la force qui s'exerce verticalement, suivant l'axe du décentrement géométrique, n'est en fait que la composante suivant cet axe de la force d'attraction magnétique radiale.

I.2. Variation de la force d'attraction F en fonction du décentrement relatif x à courant d'excitation J donné

Sachant que la force d'attraction est proportionnelle au carré du courant d'excitation, de la caractéristique $J(x)$ à F égal à 5.300N, on peut déduire la caractéristique $F(x)$ à J constant.

Pour une valeur de x donnée et pour $F_1=5.300$ N, il correspond d'après la première caractéristique une valeur de J_1 . Pour la même valeur de x et pour une valeur de J du courant d'excitation, la force F sera

$$F = F_1 \left(\frac{J}{J_1} \right)^2$$

En appliquant cette relation pour diverses valeurs de x auxquelles correspondent diverses valeurs de J_1 , on détermine, point par point, avec $F_1=5.300N$ et J donné et constant, la caractéristique $F(x)$ à J constant. Par exemple, pour J valant successivement 5,7 et 9 A, les calculs ont été reportés au tableau VI.3 de l'annexe et les courbes à la figure VI.3.

I.3. Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux.

Lors des rappels du chapitre II, nous avons vu que dans le cas d'une répartition sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer, la force d'attraction (relation II-10) est

$$F = F_x = C \frac{0,85x}{(1-0,82x^2)^{3/2}}$$

$$\text{avec } C = \frac{1}{2} \pi DL \frac{B_m^2}{2\mu_0}$$

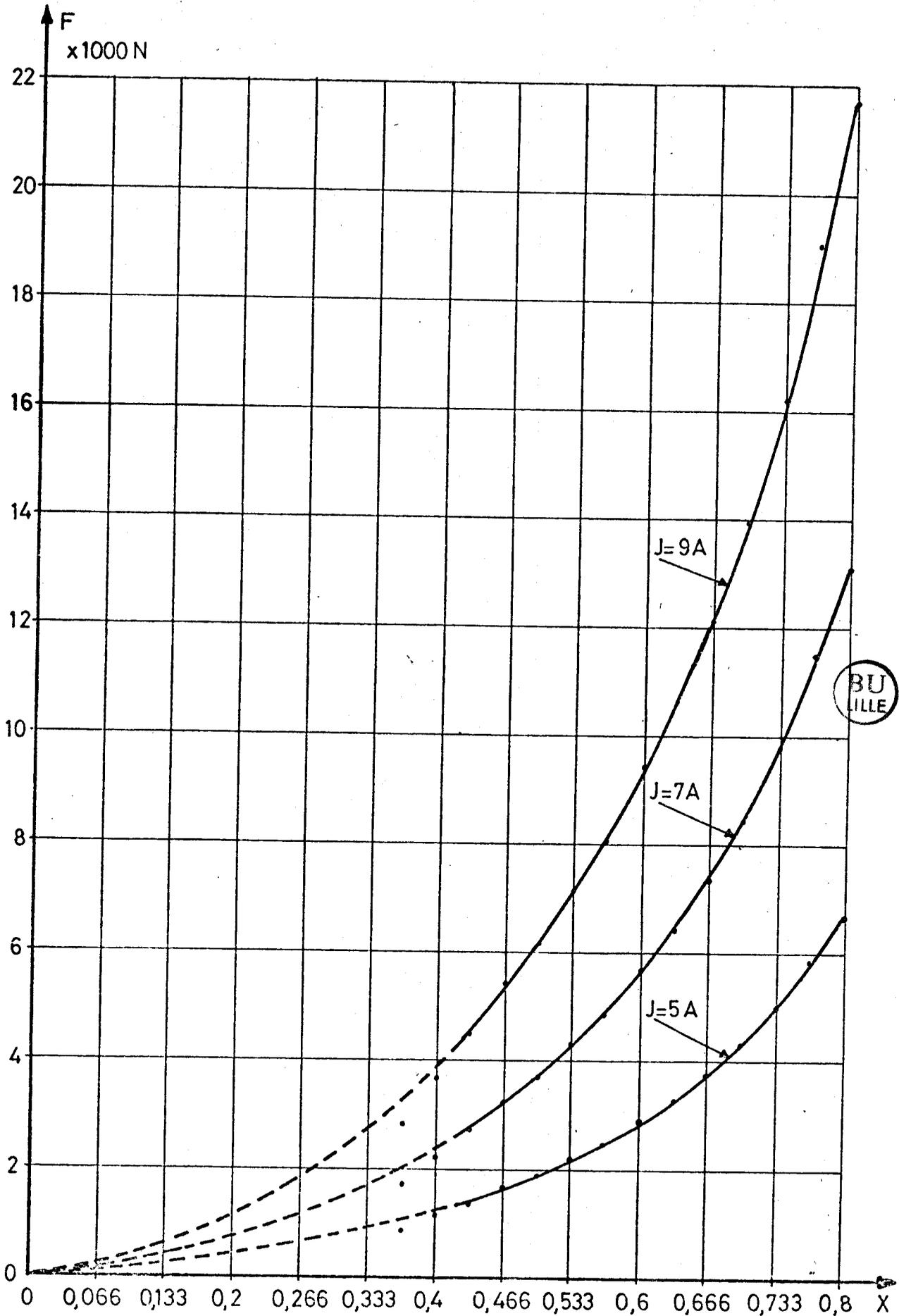


Figure VI.3

. Par ailleurs, en l'absence de décentrement, la force électromotrice à vide aux bornes d'un enroulement est donnée par la relation

$$E_o = \sqrt{2} K_1 m n L \Omega \frac{D}{2} B_{mo}$$

où m est le nombre d'encoches par pôle et par phase,

K_1 , le coefficient de bobinage correspondant à m ,

n , le nombre de spires par section,

L , la longueur utile de l'induit,

Ω , la vitesse angulaire de rotation du rotor ; $\Omega_{rd/s} = 2\pi \frac{N_T/min}{60}$,

D , le diamètre d'alésage de l'induit,

et B_{mo} , l'induction maximale dans l'entrefer.

Pour notre machine expérimentale, $m=3; K_1=0,96; n=2; L=0,195m;$
 $N=750T/min; \Omega=78,54rd/s; D=0,5m.$

Par ailleurs $\mu_o = 4\pi 10^{-7} H/m.$

Nous avons donc $B_{mo} = 0,032 E_o$; $C = 62,4 E_o^2.$

Pour tout point de la caractéristique de la figure VI.2 de coordonnées x et J , ou pour tout couple (x, J) du tableau VI.2, la force mesurée est $F_m = 5.300N.$

Pour chaque valeur de J du tableau VI.2, nous déduisons de la caractéristique à vide $E_o(J)$ à $N=750T/min$ de la figure IV.4, la valeur de E_o correspondante. Connaissant x , la force peut se calculer par la relation :

$$F_c = 53,04 \frac{x E_o^2}{(1-0,82x^2)^{3/2}}$$

Pour comparer les valeurs mesurée F_m et calculée F_c nous avons fait le rapport $K_f = F_m / F_c.$

Les calculs sont reportés au tableau VI.4 de l'annexe. Le rapport K_f est à peu près constant mais cependant très inférieur à l'unité. Sa valeur moyenne est 0,59.

Le calcul théorique surestime nettement la valeur de la force d'attraction magnétique radiale. Pour notre machine expérimentale, nous avons

$$F_{réelle} = 0,59 F_{théorique}.$$

II-DETERMINATION DE LA REDUCTION DE LA FORCE D'ATTRACTION MAGNETIQUE RADIALE

A décentrement donné, nous avons remarqué immédiatement qu'il faut un courant d'excitation nettement supérieur pour soulever le stator dès que l'on effectue le couplage en parallèle des enroulements. Afin que nos résultats correspondent toujours à un régime où la saturation magnétique n'existe pas nous avons commencé par réduire le poids apparent du stator.

Un dispositif mécanique peu encombrant, facile à mettre en oeuvre et peu onéreux, consiste à utiliser des rondelles élastiques BELLEVILLE dont le schéma est à la figure VI.4.

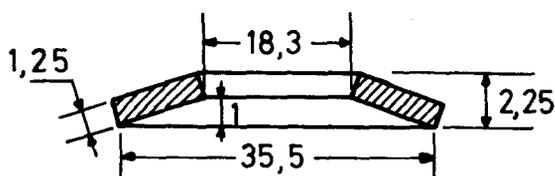


Figure VI.4



On intercale ces rondelles à la place des cales, mais, on ne laisse pas reposer le stator complètement sur celles-ci, sinon la force résultante du poids du stator et de la force de réaction des rondelles serait nulle. On utilise le système vis-écrou de levage du stator de façon que le stator n'aplatisse que légèrement les rondelles. La force de réaction des rondelles, fonction de leur diminution d'épaisseur est alors inférieure au poids du stator. On obtient de cette façon une diminution apparente du poids du stator.

Ces rondelles sont calibrées. Compte tenu de leurs dimensions géométriques, une courbe nous donne la valeur de la force de réaction en fonction de la diminution d'épaisseur. Il nous serait donc facile de déterminer cette force. Ici cela s'est révélé inutile car nous allons donner les résultats en valeur relative.

Lorsqu'on augmente le courant d'excitation, il faut noter la valeur de celui-ci juste avant que le comparateur décèle un mouvement ascendant du stator. La force d'attraction magnétique radiale équilibre alors le poids apparent du stator. Au delà, la force de réaction des rondelles diminue et le poids apparent du stator augmente.

Nous avons fixé le décentrement relatif à la valeur $x=0,666$ et nous avons fait les essais suivants.

1er essai

Le rotor étant à l'arrêt, un axe polaire de celui-ci étant dans l'axe du décentrement, les enroulements statoriques étant en circuit ouvert, il faut un courant d'excitation $J=2,9$ A juste avant le décollage du stator. Nous avons vu ci-dessus pourquoi il est nécessaire de faire cet essai à vitesse de rotation nulle.

2e essai

On réalise les différents couplages et la vitesse de rotation étant $N=750$ T/min on mesure à nouveau le courant d'excitation J juste avant le soulèvement du stator.

Ici la rotation ne fausse pas les résultats. L'une des remarques finales du chapitre précédent a montré que, excepté pour $a=2$, $g=1$, les courants de circulation font à peu près coïncider l'axe magnétique avec l'axe du décentrement géométrique. Les valeurs numériques de J' pour les différents couplages sont données au tableau VI.5 de l'annexe.

Résultats

Pour une force d'attraction F égale au poids apparent du stator, à l'arrêt et avec des enroulements statoriques en circuit ouvert, le courant d'excitation est J , en rotation et avec des courants de circulation, le courant d'excitation est J' .

A l'arrêt, la force d'attraction est proportionnelle au carré du courant d'excitation. Dans ces conditions, la force correspondant au courant J' est égale à F_1 , tel que

$$F_1 = F \left(\frac{J'}{J}\right)^2$$

A décentrement relatif x donné, la réduction de la force d'attraction est

$$\Delta F = F_1 - F = F \left(\left(\frac{J'}{J}\right)^2 - 1 \right),$$

soit en pourcentage,

$$\Delta F\% = 100 \cdot \frac{F_1 - F}{F} = 100 \left(1 - \left(\frac{J}{J'}\right)^2 \right)$$

avec, pour $x = 0,666$, $J = 2,9$ A.

. Les résultats obtenus pour les différents couplages sont également au tableau VI.5. Comme on peut le constater, la réduction est très importante (environ 90%) s'il y a suffisamment de voies en parallèle. Pour les couplages à nombre de voies faible, il faut qu'il y ait suffisamment de connexions équipotentiellles. Ce n'est donc finalement que pour $a=2, g=1$ que la réduction est la plus faible (environ 60%).

Remarques :

1) La valeur trouvée pour $a=2, g=1$ n'est pas très significative. Pour ce couplage l'axe magnétique n'est pas confondu avec l'axe de décentrement géométrique. Au courant d'excitation J' ne correspond en fait que la composante, suivant la verticale, de la force d'attraction. La valeur de J est donc sous-estimée, et la réduction relative $\Delta F\%$ est certainement supérieure à la réalité.

2) On a vu, dans l'une des remarques finales du chapitre précédent, qu'il n'est pas nécessaire de coupler tous les enroulements pour créer les courants de circulation et pour ramener (sauf pour $a=2, g=1$) l'axe magnétique en coïncidence avec l'axe du décentrement géométrique, mais cela au prix de courants de circulation plus intenses.

De la même façon, il n'est pas nécessaire de coupler tous les enroulements pour obtenir la réduction de la force d'attraction magnétique radiale, mais les courants de circulation sont plus intenses.

Par exemple, en n'utilisant que la moitié des enroulements, on obtient pour les différents couplages possibles ($a=4$; $a=2, g=1$; $a=2, g=2$) des réductions très voisines de celles trouvées en couplant la totalité des enroulements.

C H A P I T R E 7

C O N C L U S I O N

Le problème du décentrement des machines synchrones a été traité de façon théorique dans les thèses de S. BEN CHAABANE et A. BAHRI. Nous en avons rappelé l'essentiel au chapitre II de notre étude.

Cette théorie a été élaborée en supposant un bobinage statorique à une couche. Notre machine expérimentale ayant un bobinage à deux couches, nous avons étendu au chapitre III, les points principaux de la théorie à ce type de bobinage.

Au chapitre IV, nous avons décrit la machine expérimentale, et nous en avons fait une reconnaissance aussi complète que possible. En particulier nous avons relevé les caractéristiques à puissance réduite, mesuré les résistances et les diverses réactances.

L'étude expérimentale présentée aux chapitres V et VI constitue surtout notre travail. Tous les essais ont été effectués en l'absence de saturation magnétique afin de respecter cette hypothèse qui a été faite lors de l'étude théorique. Toutes les mesures ont été faites avec un maximum de précision, car l'évolution du décentrement relatif x n'entraîne que de faibles variations des tensions aux bornes des enroulements.

Si certains résultats expérimentaux confirment bien la théorie, en revanche, d'autres sont nettement différents de ce que laissait prévoir l'étude théorique. Cette divergence, lorsqu'elle existe, est due, soit aux simplifications de calcul qui étaient nécessaires pour mener à terme les calculs théoriques, soit à des phénomènes qui n'ont pas été pris en compte dans l'étude théorique.

Les principales constatations, que nous avons effectuées lors de l'étude expérimentale, sont les suivantes.

1) Fonctionnement à vide avec rotor décentré

. A décentrement donné du rotor par rapport au stator, les valeurs efficaces $E(q)$ des forces électromotrices induites dans les trois phases sont identiques.

. La somme arithmétique $\sum_{k=1}^8 E(q,k)$ des valeurs efficaces des forces électromotrices, induites dans les enroulements constituant une phase, est pratiquement égale à la valeur efficace $E(q)$ de la force électromotrice induite dans la phase, et ceci quelle que soit la phase. Les forces électromotrices induites dans les enroulements d'une phase sont approximativement en phase. Le système triphasé des forces électromotrices statoriques est pratiquement équilibré.

. Les rapports $r(q,k) = E(q,k)/E_0(q,k)$, fonctions du décentrement relatif x , quotients des forces électromotrices mesurées aux bornes des enroulements en circuit ouvert, respectivement avec décentrement et sans décentrement, diffèrent sensiblement de ceux évalués théoriquement. Les différences sont de deux types.

Tout d'abord, on s'attendait à avoir des forces électromotrices maximales dans l'enroulement dont le centre est le plus proche de l'endroit où l'entrefer est le plus réduit, et minimal dans l'enroulement diamétralement opposé, là où l'entrefer présente sa plus grande épaisseur. En réalité, ces forces électromotrices extrêmes apparaissent dans des enroulements diamétralement opposés, dont les centres sont sur un axe, que nous avons appelé axe magnétique, décalé dans les sens de rotation d'un angle compris entre 45 et 50° par rapport à l'axe du décentrement géométrique. Cet écart par rapport à ce que l'on prévoyait est probablement dû aux circuits amortisseurs de chaque pôle, dont il n'a pas été tenu compte dans l'étude théorique.

On constate ensuite un écart au point de vue des valeurs numériques. On s'attendait à avoir des rapports $r(q,k)$ plus grands que l'unité pour tous les enroulements dont le centre est en un point où l'entrefer est réduit, et plus petit que un pour tous ceux dont le centre est en un point où l'entrefer est augmenté. On constate expérimentalement que tous les rapports $r(q,k)$ sont plus grands que un. De plus, pour le premier type d'enroulement, le rapport $r(q,k)$, bien que supérieur à l'unité, est néanmoins inférieur à la valeur calculée, et ceci d'autant plus que le centre de l'enroulement est proche de l'axe du décentrement géométrique ($\theta=0^\circ$). Pour le second type, ce rapport supérieur à l'unité est donc, à fortiori, plus grand que la valeur calculée, et ceci d'autant plus que le centre de l'enroulement est proche de $\theta = 180^\circ$.

Pour les enroulements, dont les centres sont proches de $\theta=90^\circ$ et 270° , les valeurs de $r(q,k)$ calculées et mesurées sont très voisines.

. L'observation à l'oscilloscope met en évidence des forces électromotrices induites dans les enroulements qui ne sont pas fonctions sinusoïdales du temps.

. Les rapports $r(q)=E(q)/E_0(q)$, fonctions du décentrement relatif x , quotients des forces électromotrices mesurées aux bornes des phases en circuit ouvert, respectivement avec décentrement et sans décentrement, sont bien identiques pour les trois phases. Les valeurs théoriques et expérimentales ne sont proches que pour les faibles valeurs de x .

. Toutes ces observations et constatations semblent remettre en cause, tout au moins partiellement, deux hypothèses de calcul qui avaient été adoptées lors de l'étude théorique :

Peut-on encore, s'il existe des flux dus aux circuits amortisseurs, supposer la constance de la force magnétomotrice relative à chaque pôle ?

Peut-on admettre que l'induction face à chaque point fixe de la périphérie du stator est une fonction sinusoïdale du temps?

2) Couplage en parallèle des enroulements statoriques

. Ce couplage en parallèle est à l'origine des courants de circulation. Les différents couplages possibles sont caractérisés par $a=8$; $a=4, g=1$; $a=4, g=2$; $a=2, g=1$; $a=2, g=2$; $a=2, g=4$.

a) Les tensions

. Comme à vide, les tensions apparaissant entre divers points d'une phase sont en phase.

. Lorsqu'elles existent, les connexions équipotentiellles répartissent également, aux bornes de chaque groupe, la tension de la phase.

. Les tensions $E_r(q)$ des trois phases sont égales et, pour un nombre de voies donné, elles ne dépendent pas du nombre de groupes.

. D'un couplage à l'autre, les tensions $E_r(q)$ se déduisent simplement les unes des autres par ces relations.

$$E_r(q)_{\text{pour } a=2} = 2E_r(q)_{\text{pour } a=4} = 4E_r(q)_{\text{pour } a=8}.$$

. Pour le couplage $a=8$, la tension $E_r(q)$ est pratiquement égale à celle qui existait, à vide, dans les enroulements dont les centres sont proches d'un axe perpendiculaire à l'axe magnétique.

On peut donc toujours prévoir, pour toute valeur de x et pour tout type de couplage et à partir de l'essai à vide, la tension $E_r(q)$ aux bornes des phases lorsqu'il y a des courants de circulation.

b) Les courants de circulation

. A x donné, c'est pour les couplages $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ que les courants de circulation sont les plus intenses. Ils sont nettement plus faibles pour les couplages $a=4, g=2$; $a=2, g=1$ et $a=2, g=4$ et encore un peu plus réduites pour le couplage $a=8$.

. Excepté pour $a=2$, les courants de circulation diffèrent d'une voie à l'autre et ne sont pas en phase.

c) Les réactances limitant les courants de circulation

. Pour un couplage et un enroulement (q, k) donnés, ces réactances sont indépendantes du décentrement relatif x .

. Pour un couplage donné, elles varient d'un enroulement à l'autre.

. Pour un enroulement donné, elles varient d'un couplage à l'autre. Néanmoins, elles ont des valeurs très proches pour les couplages $a=4, g=2$ et $a=2, g=4$ d'une part et $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ d'autre part.

. C'est le couplage $a=8$, qui donne à chacun des enroulements (q, k) la réactance la plus forte. Viennent ensuite les couplages $a=4, g=2$ et $a=2, g=4$ puis les couplages $a=4, g=1$ et $a=2, g=2$ et enfin le couplage $a=2, g=1$.

d) Les forces magnétomotrices de circulation

. A partir d'un exemple de couplage et de valeurs numériques relevées nous avons essayé de suivre l'évolution, en fonction du temps, de la force magnétomotrice due aux courants de circulation. La machine expérimentale ayant huit pôles, cette force magnétomotrice présente deux polarités de moins. Les six polarités sont deux à deux opposées. Au cours du temps, chacun de ses trois axes oscille autour d'une valeur moyenne et ses polarités changent de signe.

. Pour certains enroulements, la force magnétomotrice de la phase à laquelle ils appartiennent est toujours opposée à la force magnétomotrice résultante due aux courants de circulation. Pour ces enroulements bien que "débitant" du courant, leur tension augmente par rapport à celle qui existait à vide et inversement.

e) Permutation des enroulements de chaque phase

Pour un couplage comportant a voies en parallèle, il y a k/a enroulements par voie, ce qui définit k/a rangs. On peut permuer les enroulements de façon à ce qu'ils occupent successivement, dans l'une ou l'autre des voies, les k/a rangs.

Quelle que soit la permutation, les tensions $E_r(q)$ aux bornes des phases restent les mêmes.

L'ensemble des tensions $E_r(q,k)$ aux bornes des enroulements se rangent sur k/a courbes. La première courbe concerne les tensions $E_r(q,k)$ des enroulements lorsqu'ils occupaient le premier rang, la deuxième courbe concerne les tensions $E_r(q,k)$ des enroulements lorsqu'ils occupaient le second rang, etc...

f) Couplage partiel des enroulements de chaque phase

Nous avons fait des essais en ne couplant que la moitié des enroulements de chaque phase. A nombre identique d'enroulements par voie, on obtient les mêmes tensions que si on avait utilisé la totalité des enroulements, mais en revanche, les courants de circulation sont beaucoup plus intenses.

De la mesure des tensions aux bornes des enroulements en circuit ouvert, on se rend compte que l'existence des courants de circulation ramène l'axe magnétique presque en coïncidence avec l'axe du décentrement géométrique. Il en est donc de même de la direction de la force d'attraction magnétique radiale. De plus, ces courants diminuent l'induction maximale en tout point de l'entrefer dont l'épaisseur est réduite et inversement. Les courants de circulation contribuent donc à la diminution de la force d'attraction magnétique radiale.

Ces résultats sont moins satisfaisants si le nombre de voies est faible, mais alors la présence des connexions équipotentiellles permet d'y remédier.

g) La force d'attraction magnétique radiale et sa réduction

. Dans un fonctionnement à vide, et pour chaque valeur du décentrement relatif x , nous avons mesuré le courant d'excitation J à l'origine d'une force d'attraction magnétique radiale F égale et opposée au poids P du stator, puis établi la courbe $J(x)$ pour une valeur de F constante et égale à P . La force F étant proportionnelle au carré du courant d'excitation J , nous en avons déduit la courbe $F(x)$ à J constant.

. Afin de comparer les résultats expérimentaux et théoriques, à partir des coordonnées J et x de quelques points de la courbe $J(x)$, pour laquelle la force mesurée F_m est constante et égale à P , nous avons fait le calcul F_c de cette force en supposant une répartition sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer. Si le rapport F_m/F_c est pratiquement constant, il est néanmoins très inférieur à l'unité. Le calcul théorique surestime nettement la valeur de la force d'attraction magnétique.

. Pour avoir une idée de la réduction de la force d'attraction magnétique radiale, due aux courants de circulation, nous avons déterminé cette force, pour une valeur de x donnée successivement sans puis avec ces courants. La réduction obtenue est très importante et aux environs de 90% s'il y a un nombre suffisant de voies en parallèle. Si ce nombre de voies est faible, les connexions équipotentiellles sont alors indispensables. Si l'on n'a que $a=2$ et $g=1$, la réduction n'est que de 60% et encore ce chiffre est surestimé.

. Nous n'avons pas la prétention d'avoir résolu le problème compliqué que constitue l'étude du décentrement du rotor des machines synchrones. Ce n'était d'ailleurs pas notre travail qui consistait plutôt en la vérification expérimentale des études théoriques antérieures et surtout en l'étude de quelques points particuliers délicats.

L'étude des réactances limitant les courants de circulation s'est révélée être particulièrement difficile. Il n'apparaît pratiquement aucune loi quand, à couplage donné, on passe d'un enroulement à l'autre, ou, à enroulement donné, on passe d'un couplage à l'autre. Nous pensons que c'est l'action des amortisseurs, à l'origine d'une rotation de l'axe magnétique, qui vient perturber et masquer ces lois.

Il est certainement nécessaire de reprendre certains points de notre étude expérimentale en ne se contentant plus de mesurer des valeurs efficaces de tensions et de courants mais en déterminant de plus leurs déphasages.

Il sera alors possible de reconsidérer l'étude théorique avec moins de simplification dans les calculs et surtout, en prenant en compte l'influence des amortisseurs.

A N N E X E

J(A)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
E_o (V)	10,95	14,87	19,54	24,90	31,05	38,20	45,05	52,84	60,41	68,00	75,64	83,43

6	6,5	6,83	8,2	9,2	11,5	12,4	13,44	15,4	16,4	17,3	18,44
90,81	97,40	101,95	121,40	134,1	158,40	167,35	176,05	190,8	196,35	201,55	208,4

20	22,75	22,15	27	28,4	30,6	32,74	41,4
215,35	227,5	234,1	238,25	241,75	247,15	251,80	264,85

Tableau IV.1 - E_o (J) à N = 750 T/min.

J(A)	0	1,485	5,7	12,2	18,4
I_{CC} (A)	3,3	17,3	57	114	171

Tableau IV.2 - I_{CC} (J) à N = 750 T/min

BU
LILLE

V_A (V)	0,0196	0,058	0,1156	0,152
I_A (A)	0,5	1,5	2,875	3,85
R_A (Ω)	0,0392	0,0386	0,04	0,0394

Phase A, $R_A = 0,0393\Omega$

V_B (V)	0,0196	0,0584	0,1144	0,1712
I_B (A)	0,5	1,5	2,925	4,36
R_B (Ω)	0,0392	0,0389	0,03911	0,03926

Phase B, $R_B = 0,03911\Omega$

V_C (V)	0,0196	0,059	0,1158	0,1952
I_C (A)	0,5	1,5	2,95	4,835
R_C (Ω)	0,0392	0,03933	0,03925	0,0403

Phase C, $R_C = 0,0395\Omega$ Tableau IV.3 - $R = 0,039\Omega$

V(V)	10,75	14,3	16,38	18,2	20,44
I_m (A)	6,74	9,1	10,5	11,88	13,26
X_d (Ω)	1,594	1,571	1,56	1,542	1,53
V(V)	10,2	13,55	15,66	17,2	19,66
I_M (A)	10,5	13,66	14,9	16,86	18,24
X_q (Ω)	0,97	0,99	1,05	1,02	1,077

Tableau IV.4 - $X_d = 1,56\Omega$ - $X_q = 1,02\Omega$

P(W)	111,25	131	187,5	392	449
I(A)	14,5	16,1	18,65	27,25	29,15
X_i (Ω)	0,306	0,292	0,313	0,306	0,306

Tableau IV.5 - $X_i = 0,305\Omega$

Position longitudinale:

I(A)	P(W)	U(V)	Z''_d (Ω)	R''_d (Ω)	X''_d (Ω)
15,2	40,5	7,3	0,240	0,088	0,224



Position transversale :

I(A)	P(W)	U(V)	Z''_q (Ω)	R''_q (Ω)	X''_q (Ω)
8,8	28,75	7,7	0,438	0,186	0,396

Tableau IV.6

I(A)	P(W)	U(V)	Z_o (Ω)	R_o (Ω)	X_o (Ω)
9,2	9,4	4,5	0,163	0,037	0,159
11,13	14,5	5,44	0,163	0,039	0,158
12,13	19,5	6,12	0,168	0,044	0,162
27,25	89	13,45	0,165	0,040	0,160

Tableau IV.7 - $X_o = 0,160\Omega$

x	0,066	0,133	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J(A)	7,45	7	7	5	5,5	5	5	4	4	3	2,6
E(1,1)	13,96	13,44	13,71	12,23	11,47	10,68	10,92	8,91	9,15	7,01	6,28
E(1,2)	14,02	13,55	13,9	12,45	11,76	10,99	11,3	9,27	9,56	7,36	6,62
E(1,3)	13,99	13,52	13,86	12,37	11,65	10,86	11,14	9,13	9,38	7,18	6,44
E(1,4)	13,9	13,34	13,55	12,03	11,24	10,39	10,58	8,59	8,76	6,65	5,93
E(1,5)	13,79	13,14	13,24	11,64	10,77	9,87	9,96	8,02	8,09	6,1	5,38
E(1,6)	13,74	13,04	13,07	11,43	10,53	9,57	9,61	7,72	7,73	5,8	5,09
E(1,7)	13,75	13,08	13,12	11,5	10,59	9,66	9,71	7,81	7,83	5,89	5,18
E(1,8)	13,84	13,24	13,37	11,83	10,99	10,12	10,24	8,3	8,4	6,37	5,65
E(1)	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53
E(2,1)	14,01	13,53	13,87	12,4	11,7	10,93	11,22	9,21	9,47	7,29	6,55
E(2,2)	14,01	13,54	13,91	12,43	11,73	10,96	11,24	9,23	9,49	7,3	6,57
E(2,3)	13,94	13,41	13,67	12,17	11,39	10,58	10,79	8,8	8,98	6,85	6,12
E(2,4)	13,84	13,21	13,34	11,77	10,92	10,03	10,15	8,2	8,29	6,27	5,55
E(2,5)	13,75	13,06	13,1	11,47	10,57	9,64	9,69	7,78	7,8	5,86	5,15
E(2,6)	13,74	13,05	13,07	11,45	10,54	9,6	9,62	7,74	7,75	5,81	5,11
E(2,7)	13,81	13,17	13,27	11,7	10,84	9,93	10,02	8,11	8,19	6,18	5,46
E(2,8)	13,92	13,37	13,6	12,1	11,33	10,49	10,69	8,72	8,9	6,8	6,08
E(2)	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53
E(3,1)	14,02	13,56	13,92	12,46	11,77	10,99	11,31	9,28	9,57	7,35	6,61
E(3,2)	13,97	13,46	13,77	12,27	11,54	10,73	10,98	8,97	9,2	7,02	6,29
E(3,3)	13,86	13,27	13,43	11,88	11,06	10,2	10,35	8,39	8,53	6,45	5,73
E(3,4)	13,77	13,09	13,16	11,53	10,66	9,73	9,8	7,88	7,92	5,96	5,25
E(3,5)	13,74	13,04	13,06	11,42	10,51	9,58	9,6	7,71	7,73	5,79	5,08
E(3,6)	13,78	13,12	13,19	11,59	10,71	9,8	9,85	7,95	7,98	6,02	5,3
E(3,7)	13,88	13,3	13,49	11,96	11,17	10,31	10,46	8,51	8,66	6,59	5,87
E(3,8)	13,99	13,49	13,79	12,33	11,6	10,81	11,08	9,08	9,33	7,17	6,45
E(3)	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53



Tableau V.1 - Les forces électromotrices $E(q,k)$ et $E(q)$ sont en volts.

	0,066	0,133	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
A)	7,45	7	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
(q) _(V)	110,16	104,23	104,23	90,81	83,43	75,64	75,64	60,41	60,41	45,05	39,35
(q,k) _(V)	13,77	13,0288	13,0288	11,3513	10,4288	9,455	9,455	7,5513	7,5513	5,6313	4,9188
1) _(V)	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53
E(1,k) _{1(V)}	110,99	106,35	107,82	95,48	89	82,14	83,46	67,75	68,9	52,35	46,57
1,1)	1,0138	1,0315	1,0522	1,0774	1,0998	1,1295	1,1549	1,1799	1,2117	1,2448	1,2767
1,2)	1,0182	1,0400	1,0668	1,0968	1,1277	1,1623	1,1951	1,2276	1,2660	1,3070	1,3458
1,3)	1,0160	1,0377	1,0637	1,0897	1,1171	1,1486	1,1782	1,2091	1,2422	1,2750	1,3093
1,4)	1,0094	1,0238	1,0400	1,0598	1,0778	1,0988	1,1189	1,1377	1,1601	1,1809	1,2056
1,5)	1,0014	1,0085	1,0162	1,0254	1,0327	1,0439	1,0534	1,0621	1,0714	1,0832	1,0938
1,6)	0,9978	1,0008	1,0031	1,0069	1,0097	1,0121	1,01639	1,0224	1,0237	1,0299	1,0348
1,7)	0,9985	1,0040	1,0070	1,0131	1,0155	1,0216	1,0269	1,0343	1,0369	1,0459	1,0531
1,8)	1,0051	1,0162	1,0262	1,0422	1,0538	1,0703	1,0830	1,0992	1,1124	1,1312	1,1487
1)	1,0076	1,0198	1,0342	1,0505	1,0656	1,0840	1,1026	1,1223	1,1405	1,1609	1,1824
	0,066	0,133	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
A)	7,45	7	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
(q) _(V)	110,16	104,23	104,23	90,81	83,43	75,64	75,64	60,41	60,41	45,05	39,35
(q,k) _(V)	13,77	13,0288	13,0288	11,3513	10,4288	9,455	9,455	7,5513	7,5513	5,6313	4,9188
2) _(V)	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53
E(2,k) _{1(V)}	111,01	106,34	107,83	95,49	89,02	82,16	83,42	67,79	68,87	52,36	46,59
2,1)	1,0174	1,0384	1,0645	1,0924	1,1219	1,1560	1,1866	1,2197	1,2541	1,2945	1,3316
2,2)	1,0182	1,0392	1,0676	1,0950	1,1248	1,1591	1,1887	1,2223	1,2568	1,2963	1,3357
2,3)	1,0123	1,0292	1,0492	1,0721	1,0922	1,1189	1,1412	1,1654	1,1892	1,2164	1,2442
2,4)	1,0043	1,0139	1,0238	1,0369	1,0471	1,0608	1,0735	1,0872	1,0978	1,1134	1,1283
2,5)	0,9985	1,0024	1,0054	1,0105	1,0135	1,0195	1,0248	1,0303	1,0330	1,0406	1,0470
2,6)	0,9978	1,0016	1,0031	1,0087	1,0107	1,0153	1,0174	1,0250	1,0263	1,0317	1,0389
2,7)	1,0029	1,0108	1,0185	1,0307	1,0394	1,0502	1,0597	1,0740	1,0846	1,0974	1,1100
2,8)	1,0109	1,0262	1,0438	1,0660	1,0864	1,1094	1,1306	1,1548	1,1786	1,2075	1,2361
2)	1,0076	1,0198	1,0342	1,0505	1,0656	1,0840	1,1026	1,1223	1,1405	1,1609	1,1824

x	0,066	0,133	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
$r(A)$	7,45	7	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_o(q)_{(V)}$	110,16	104,23	104,23	90,81	83,43	75,64	75,64	60,41	60,41	45,05	39,35
$E_o(q,k)_{(V)}$	13,77	13,0288	13,0288	11,3513	10,4288	9,455	9,455	7,5513	7,5513	5,6313	4,9188
$E(3)_{(V)}$	111	106,3	107,8	95,4	88,9	82	83,4	67,8	68,9	52,3	46,53
$\sum_{k=1}^8 E(3,k)_{(V)}$	111,01	106,32	107,81	95,44	88,02	82,15	83,43	67,77	68,92	52,35	46,58
$r(3,1)$	1,0182	1,0407	1,0684	1,0977	1,1286	1,1623	1,1962	1,2290	1,2674	1,3052	1,3438
$r(3,2)$	1,0145	1,0331	1,0569	1,0809	1,1066	1,1348	1,1613	1,1879	1,2197	1,2466	1,2787
$r(3,3)$	1,0065	1,0185	1,0308	1,0466	1,0605	1,0788	1,0946	1,1111	1,1296	1,1454	1,1650
$r(3,4)$	1	1,0047	1,0100	1,0157	1,0222	1,0290	1,0365	1,0435	1,0488	1,0584	1,0673
$r(3,5)$	0,9978	1,0008	1,0024	1,0060	1,0078	1,0132	1,0153	1,0210	1,0237	1,0282	1,0328
$r(3,6)$	1,0007	1,0070	1,0123	1,0210	1,0270	1,0364	1,0418	1,0528	1,0568	1,0690	1,0775
$r(3,7)$	1,0080	1,0208	1,0354	1,0536	1,0711	1,0904	1,1063	1,1270	1,1468	1,1702	1,1934
$r(3,8)$	1,0160	1,0354	1,0584	1,0862	1,1123	1,1433	1,1719	1,2025	1,2356	1,2732	1,3113
$r(3)$	1,0076	1,0198	1,0342	1,0505	1,0656	1,0840	1,1026	1,1223	1,1405	1,1609	1,1824



Tableau V.2

θ°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
(2,1) _(mWb)	12	11,8	10,2	7,3	3,6	0,1	-3,8	-7,5	-10,4	-12
(2,8) _(mWb)	11,9	11,5	9,5	6,3	2,5	-0,6	-4,7	-8,2	-10,7	-11,9

Tableau V.3. Les positions $\theta=0^\circ$ correspondent à un axe de pôle nord situé successivement suivant les axes des enroulements (2,1) puis (2,8)

$$x = 0,666 ; J = 3A$$

$$1) |N| = 750 \text{ T/min} ; E_o(q) = 45,05V ; E_o(q,k) = E_o(q)/3 = 5,63125V ;$$

$$r(q,k) = \frac{E(q,k)}{E_o(q,k)}$$

$$a) N = +750 \text{ T/min}$$

Enroulement(q,k)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)
$E(q,k)$ (V)	7,01	7,36	7,18	6,65	6,1	5,8	5,89	6,37
$r(q,k)$	1,2448	1,3070	1,2750	1,1809	1,0832	1,0299	1,0459	1,1312

(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)
7,29	7,3	6,85	6,27	5,86	5,81	6,18	6,8
1,2945	1,2963	1,2164	1,1134	1,0406	1,0317	1,0974	1,2075

(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)
7,35	7,02	6,45	5,96	5,79	6,02	6,59	7,17
1,3052	1,2466	1,1454	1,0584	1,0282	1,0690	1,1702	1,2732

.../...

b) $N = - 750T/min$

Enroulement(q,k)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)
$E(q,k)_{(V)}$	7,23	6,72	6,1	5,8	5,92	6,39	6,97	7,34
$r(q,k)$	1,2839	1,1933	1,0832	1,0299	1,0512	1,1347	1,2377	1,3034

(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)
6,92	6,29	5,86	5,83	6,2	6,78	7,25	7,33
1,2288	1,1169	1,0406	1,0353	1,1010	1,2040	1,2874	1,3017

(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)
6,49	5,95	5,8	6,04	6,57	7,13	7,38	7,1
1,1525	1,0566	1,0300	1,0725	1,1667	1,2661	1,3105	1,2608

2) $N = 385T/min$; $E'_0(q) = E_0(q) \frac{385}{750} = 23,13V$; $E'_0(q,k) = E'_0(q)/8 = 289 V$;

$r(q,k) = E(q,k)/E'_0(q,k)$



Enroulement(q,k)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)
$E(q,k)_{(V)}$	3,83	4,13	3,99	3,52	3,06	2,83	2,92	3,30
$r(q,k)$	1,3249	1,4287	1,3802	1,2177	1,0585	0,9790	1,0101	1,1415

(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)	(2,7)	(2,8)
4,07	4,08	3,70	3,20	2,87	2,84	3,15	3,65
1,4080	1,4114	1,2800	1,1070	0,9928	0,9824	1,0897	1,2626

(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)	(3,7)	(3,8)
4,12	3,85	3,36	2,95	2,83	3,03	3,48	3,96
1,4252	1,3318	1,1623	1,0205	0,9790	1,0481	1,2038	1,3700

Tableau V.4.

x	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
$J_{(A)}$	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_r(1)_{(V)}$	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$I_c(1,1)_{(A)}$	5,5	6,8	8,6	9,2	11,2	10,6	11,8	10,3	10,3
$I_c(1,2)_{(A)}$	5,8	7	8,7	9,6	11,3	10,6	11,8	10,6	10,6
$I_c(1,3)_{(A)}$	4	4,5	5,2	5,7	6,6	6,3	6,8	5,9	5,8
$I_c(1,4)_{(A)}$	3	3,6	4,5	4,9	5,8	5,5	6,2	5,5	5,4
$I_c(1,5)_{(A)}$	5,9	7,2	8,2	8,8	10,6	9,9	11	9,7	9,4
$I_c(1,6)_{(A)}$	5,6	6,8	8,3	8,8	10,8	9,8	10,9	9,6	9,1
$I_c(1,7)_{(A)}$	3,4	4,2	4,8	5,4	6,4	6	6,8	5,9	5,8
$I_c(1,8)_{(A)}$	3,1	3,7	4,3	4,8	5,7	5,3	5,9	5,1	5,9
$E_r(2)_{(V)}$	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$I_c(2,1)_{(A)}$	6,3	7,7	9,3	10	12,6	11,6	13	11,4	11,1
$I_c(2,2)_{(A)}$	5	5,9	6,8	7,3	8,6	7,9	8,8	7,6	7,5
$I_c(2,3)_{(A)}$	2,6	3	3,55	3,9	4,6	4,4	4,9	4,3	4,2
$I_c(2,4)_{(A)}$	4,9	6	7	8,1	9,3	8,9	9,8	8,5	8,4
$I_c(2,5)_{(A)}$	5,7	7,2	8,5	9,3	11	10,4	11,5	9,9	9,7
$I_c(2,6)_{(A)}$	4,6	5,4	6,4	7	8,5	7,8	8,5	7,4	7,2
$I_c(2,7)_{(A)}$	2,7	3,2	3,7	4	4,8	4,4	4,9	4,3	4,1
$I_c(2,8)_{(A)}$	4,5	5,8	6,95	7,9	9,3	8,8	10	8,7	8,7

$E_r(3)_{(V)}$	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$I_c(3,1)_{(A)}$	5,6	6,9	8	8,9	10,5	9,9	11	9,7	9,3
$I_c(3,2)_{(A)}$	3	3,4	4,1	4,2	5,1	4,6	5	4,4	4,4
$I_c(3,3)_{(A)}$	4	4,9	5,9	6,5	7,6	7,2	8	7,1	7
$I_c(3,4)_{(A)}$	5,8	7	8,4	9,7	11	10,2	11,4	10,1	9,5
$I_c(3,5)_{(A)}$	5	6,4	7,6	8,2	9,6	9,1	10,1	8,7	8,6
$I_c(3,6)_{(A)}$	2,5	3	3,6	4	4,9	4,5	4,9	4,4	4,2
$I_c(3,7)_{(A)}$	3,9	4,9	5,9	6,6	7,8	7,3	8,2	7,1	6,9
$I_c(3,8)_{(A)}$	5,6	7	8,6	9,5	11,5	10,8	12,1	10,7	10,8

Dans le montage où $a=8$, $E_r(q,1) = \dots = E_r(q,8) = E_r(q)$

a) $a = 8$



x	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J (A)	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_r(1,1)$ (V)	13,45	11,89	11,08	10,23	10,39	8,44	8,57	6,5	5,78
$E_r(1,2)$ (V)	13,45	11,87	11,07	10,21	10,37	8,42	8,54	6,47	5,76
$E_r(1,3)$ (V)	13,48	11,92	11,11	10,26	10,43	8,47	8,62	6,54	5,82
$E_r(1,4)$ (V)	13,42	11,84	11,04	10,17	10,33	8,39	8,49	6,43	5,72
$E_r(1,5)$ (V)	13,44	11,85	11,06	10,2	10,37	8,41	8,54	6,47	5,76
$E_r(1,6)$ (V)	13,46	11,91	11,09	10,24	10,39	8,45	8,57	6,5	5,78
$E_r(1,7)$ (V)	13,43	11,85	11,04	10,18	10,33	8,38	8,5	6,43	5,72
$E_r(1,8)$ (V)	13,47	11,91	11,11	10,27	10,43	8,48	8,61	6,54	5,82
$E_r(1)$ (V)	26,9	23,76	22,15	20,44	20,76	16,86	17,11	12,97	11,54
$I_c(1,1ou2)$ (A)	9,3	11,1	13	14,6	17,45	16,3	18,4	16,2	15,6
$I_c(1,3ou4)$ (A)	3,6	4,2	5,1	5,6	6,5	6,1	6,9	6	5,75
$I_c(1,5ou6)$ (A)	9,25	11	12,8	14,3	17	15,8	17,9	15,6	15,2
$I_c(1,7ou8)$ (A)	3,5	4,1	4,7	5,4	6,3	5,9	6,7	5,8	5,65
$E_r(2,1)$ (V)	13,47	11,91	11,1	10,27	10,42	8,48	8,6	6,54	5,82
$E_r(2,2)$ (V)	13,43	11,85	11,05	10,17	10,34	8,38	8,51	6,44	5,72
$E_r(2,3)$ (V)	13,46	11,9	11,1	10,26	10,41	8,47	8,59	6,52	5,8
$E_r(2,4)$ (V)	13,44	11,86	11,05	10,18	10,35	8,39	8,52	6,45	5,74
$E_r(2,5)$ (V)	13,44	11,87	11,06	10,2	10,35	8,4	8,53	6,45	5,74
$E_r(2,6)$ (V)	13,46	11,89	11,09	10,24	10,41	8,46	8,59	6,52	5,8
$E_r(2,7)$ (V)	13,43	11,86	11,05	10,19	10,35	8,39	8,51	6,44	5,73
$E_r(2,8)$ (V)	13,47	11,9	11,1	10,25	10,41	8,47	8,6	6,53	5,81
$E_r(2)$ (V)	26,9	23,76	22,15	20,44	20,76	16,86	17,11	12,97	11,54

$I_c(2,1ou2)$ (A)	8,9	10,4	12,3	13,7	16,2	15,1	17	14,9	14,4
$I_c(2,3ou4)$ (A)	4,75	5,9	7	7,95	9,4	8,9	10,2	8,9	8,7
$I_c(2,5ou6)$ (A)	8,6	10,1	11,8	13,2	15,6	14,4	16,3	14,2	13,8
$I_c(2,7ou8)$ (A)	4,7	5,8	6,8	7,8	9,25	8,6	9,9	8,6	8,3
$E_r(3,1)$ (V)	13,47	11,92	11,12	10,27	10,44	8,49	8,62	6,55	5,83
$E_r(3,2)$ (V)	13,43	11,84	11,03	10,17	10,32	8,37	8,49	6,42	5,71
$E_r(3,3)$ (V)	13,46	11,89	11,08	10,23	10,39	8,44	8,56	6,5	5,78
$E_r(3,4)$ (V)	13,44	11,87	11,07	10,21	10,37	8,42	8,55	6,47	5,76
$E_r(3,5)$ (V)	13,43	11,85	11,05	10,18	10,34	8,39	8,51	6,44	5,73
$E_r(3,6)$ (V)	13,47	11,91	11,1	10,26	10,42	8,47	8,6	6,53	5,81
$E_r(3,7)$ (V)	13,43	11,86	11,07	10,21	10,37	8,41	8,54	6,47	5,75
$E_r(3,8)$ (V)	13,47	11,9	11,08	10,23	10,39	8,45	8,57	6,5	5,79
$E_r(3)$ (V)	26,9	23,76	22,15	20,44	20,76	16,86	17,11	12,97	11,54
$I_c(3,1ou2)$ (A)	6,6	7,6	8,9	9,6	11,3	10,6	11,8	10,3	9,9
$I_c(3,3ou4)$ (A)	7,75	9,3	11,1	12,3	14,7	13,7	15,5	13,6	13,15
$I_c(3,5ou6)$ (A)	6	7,1	8,3	9,2	10,85	10,1	11,4	9,9	9,6
$I_c(3,7ou8)$ (A)	7,5	9	10,7	12,2	14,5	13,6	15,4	13,5	13,1

b) $a = 4$; $g = 1$



x	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J (A)	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_r(1,1ou3ou5ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$E_r(1,2ou4ou6ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$E_r(1)$ (V)	26,9	23,82	22,18	20,46	20,74	16,84	17,14	12,98	11,54
$I_c(1,1)$ (A)	6,45	7,8	8,9	10,3	12,6	12	13,5	11,7	11,5
$I_c(1,2)$ (A)	7	8,1	9,2	10,5	12,9	12,4	13,7	11,9	11,7
$I_c(1,3)$ (A)	4,6	5	5,8	7	7,3	7,3	7,8	6,8	6,45
$I_c(1,4)$ (A)	3,45	4,2	4,8	5,7	6,6	6,3	7	6,2	6,1
$I_c(1,5)$ (A)	6,5	7,9	8,7	10,4	12	11,3	12,8	10,9	10,7
$I_c(1,6)$ (A)	6,6	7,7	8,8	9,8	12	11,3	12,5	10,7	10,5
$I_c(1,7)$ (A)	4,1	4,7	5,2	6,2	7,3	6,75	7,7	6,6	6,5
$I_c(1,8)$ (A)	3,3	3,9	4,5	5,5	6,3	5,9	6,6	5,8	5,6
$E_r(2,1ou3ou5ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$E_r(2,2ou4ou6ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$E_r(2)$ (V)	26,9	23,82	22,18	20,46	20,74	16,82	17,14	12,98	11,54
$I_c(2,1)$ (A)	7,1	8,5	9,9	11,9	13,7	13,3	14,8	12,9	12,7
$I_c(2,2)$ (A)	5,8	6,5	7,3	7	9,8	9,2	10,2	8,7	8,6
$I_c(2,3)$ (A)	3	3,4	3,9	4,9	5,3	5,1	5,6	4,95	4,8
$I_c(2,4)$ (A)	5,5	6,6	7,5	9	10,4	10	11,1	9,5	9,4
$I_c(2,5)$ (A)	6,7	8	9,1	11	12,6	12	13,4	11,5	11,3
$I_c(2,6)$ (A)	5,2	6,2	6,8	7,3	9,3	9	9,7	8,4	8,2
$I_c(2,7)$ (A)	3	3,4	3,9	4,8	5,1	4,9	5,5	4,75	4,6

BU
LILLE

$c(2,8)$ (A)	5,3	6,4	7,4	8,8	10,55	10,1	11,4	9,9	9,7
$r(3,1ou3ou5ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$r(3,2ou4ou6ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,37	8,42	8,57	6,49	5,77
$r(3)$ (V)	26,9	23,82	22,18	20,46	20,74	16,84	17,14	12,98	11,54
$c(3,1)$ (A)	6,4	7,5	8,6	9,6	11,5	11,1	12,3	10,6	10,5
$c(3,2)$ (A)	3,4	4	4,4	4,9	5,8	5,4	5,9	5,1	4,9
$c(3,3)$ (A)	4,8	5,7	6,5	7,4	8,9	8,4	9,5	8,1	8,1
$c(3,4)$ (A)	6,6	7,7	9	10,3	12,2	11,6	13	11	10,9
$c(3,5)$ (A)	5,8	7,1	8,2	9,4	10,95	10,4	11,6	9,9	9,7
$c(3,6)$ (A)	2,9	3,5	4	4,5	5,55	5,1	5,7	5	5
$c(3,7)$ (A)	4,6	5,5	6,3	7,6	8,7	8,2	9,4	8	8
$c(3,8)$ (A)	6,4	9,3	9,3	10,8	12,95	12,4	14	12	12

c) $a = 4$, $g = 2$ 

x	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J(A)	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
_F (1,1) (V)	13,54	12,03	11,24	10,4	10,62	8,65	8,82	6,7	5,98
_F (1,2) (V)	13,55	12,04	11,26	10,43	10,66	8,67	8,84	6,72	5,99
_F (1,3) (V)	13,41	11,84	11,02	10,17	10,32	8,35	8,47	6,4	5,67
_F (1,4) (V)	13,29	11,72	10,85	9,97	10,10	8,14	8,24	6,18	5,48
_F (1,5) (V)	13,36	11,78	10,95	10,08	10,22	8,25	8,37	6,31	5,59
_F (1,6) (V)	13,36	11,78	10,93	10,06	10,20	8,24	8,35	6,29	5,57
_F (1,7) (V)	13,54	12,00	11,17	10,33	10,52	8,54	8,71	6,59	5,87
_F (1,8) (V)	13,62	12,12	11,32	10,52	10,74	8,75	8,95	6,8	6,08
_F (1)(V)	53,80	47,60	44,30	40,90	41,66	33,74	34,23	26,00	23,02
_C (1)(A)	7,90	9,30	11,00	12,20	14,30	13,50	15,50	13,30	12,80
_F (2,1) (V)	13,59	12,04	11,27	10,45	10,67	8,68	8,87	6,74	5,99
_F (2,2) (V)	13,58	12,03	11,27	10,45	10,64	8,66	8,84	6,73	5,96
_F (2,3) (V)	13,66	12,18	11,4	10,58	10,82	8,81	9,02	6,85	6,12
_F (2,4) (V)	13,46	11,96	11,12	10,28	10,45	8,46	8,62	6,52	5,78
_F (2,5) (V)	13,34	11,78	10,91	10,06	10,19	8,23	8,36	6,31	5,58
_F (2,6) (V)	13,34	11,79	10,92	10,07	10,21	8,24	8,36	6,32	5,58
_F (2,7) (V)	13,25	11,65	10,77	9,89	9,99	8,04	8,12	6,12	5,37
_F (2,8) (V)	13,43	11,88	11,04	10,2	10,36	8,39	8,55	6,47	5,72
_F (2)(V)	53,80	47,60	44,30	40,90	41,66	33,72	34,23	26,00	23,01
_C (2)(A)	7,60	9,00	10,80	12,20	14,30	13,60	15,60	13,40	13,00

F_1 (3,1) (V)	13,78	12,30	11,57	10,78	11,05	9,04	9,29	7,13	6,38
F_1 (3,2) (V)	13,60	12,06	11,30	10,47	10,67	8,69	8,84	6,75	5,99
F_1 (3,3) (V)	13,27	11,68	10,84	9,96	10,08	8,13	8,21	6,21	5,45
F_1 (3,4) (V)	13,22	11,60	10,74	9,82	9,92	7,97	8,04	6,06	5,31
F_1 (3,5) (V)	13,17	11,55	10,65	9,76	9,84	7,89	7,93	5,97	5,23
F_1 (3,6) (V)	13,33	11,77	10,90	10,03	10,15	8,18	8,29	6,25	5,51
F_1 (3,7) (V)	13,63	12,13	11,34	10,54	10,75	8,77	8,95	6,83	6,08
F_1 (3,8) (V)	13,72	12,25	11,50	10,70	10,99	8,99	9,21	7,07	6,32
F_1 (3) (V)	53,83	47,60	44,30	40,90	41,66	33,76	34,23	26,00	23,04
c (3) (A)	3,90	4,50	5,30	5,80	6,70	6,20	7,10	6,10	5,8



d) $a = 2$, $g = 1$.

x		0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J	(A)	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_r(1,1)$	(V)	13,45	11,88	11,08	10,22	10,39	8,44	8,57	6,50	5,79
$E_r(1,2)$	(V)	13,44	11,87	11,06	10,20	10,37	8,43	8,55	6,48	5,77
$E_r(1,3)$	(V)	13,47	11,90	11,11	10,25	10,44	8,48	8,61	6,53	5,83
$E_r(1,4)$	(V)	13,41	11,86	11,03	10,16	10,32	8,38	8,49	6,43	5,73
$E_r(1,5)$	(V)	13,42	11,87	11,06	10,20	10,36	8,42	8,54	6,48	5,77
$E_r(1,6)$	(V)	13,46	11,88	11,08	10,23	10,40	8,45	8,56	6,50	5,79
$E_r(1,7)$	(V)	13,43	11,85	11,04	10,17	10,32	8,39	8,50	6,43	5,73
$E_r(1,8)$	(V)	13,46	11,91	11,11	10,25	10,43	8,48	8,60	6,53	5,83
$E_r(AA')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,56
$E_r(A'A'')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,56
$E_r(1)$	(V)	53,76	47,50	44,28	40,84	41,50	33,72	34,20	25,94	23,11
$I_c(1,1ou2)$	(A)	9,40	11,30	13,50	15,00	17,80	16,60	18,90	16,70	15,7
$I_c(1,5ou6)$	(A)	9,40	11,30	13,50	15,00	17,80	16,60	18,90	16,70	15,7
$I_c(1,3ou4)$	(A)	3,60	4,30	5,10	5,65	6,65	6,10	7,00	6,40	5,9
$I_c(1,7ou8)$	(A)	3,60	4,30	5,10	5,65	6,65	6,10	7,00	6,40	5,9
$E_r(2,1)$	(V)	13,46	11,89	11,10	10,23	10,43	8,49	8,60	6,54	5,82
$E_r(2,2)$	(V)	13,43	11,86	11,05	10,18	10,33	8,39	8,50	6,45	5,74
$E_r(2,3)$	(V)	13,48	11,91	11,10	10,23	10,41	8,47	8,59	6,52	5,80
$E_r(2,4)$	(V)	13,42	11,86	11,04	10,17	10,33	8,40	8,51	6,45	5,74
$E_r(2,5)$	(V)	13,42	11,85	11,06	10,17	10,35	8,41	8,51	6,46	5,75
$E_r(2,6)$	(V)	13,46	11,90	11,10	10,24	10,41	8,47	8,59	6,53	5,81
$E_r(2,7)$	(V)	13,42	11,85	11,04	10,18	10,33	8,40	8,50	6,44	5,73
$E_r(2,8)$	(V)	13,46	11,89	11,10	10,23	10,41	8,46	8,59	6,53	5,81
$E_r(BB')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,54
$E_r(B'B'')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,56
$E_r(2)$	(V)	53,76	47,50	44,28	40,84	41,50	33,72	34,20	25,94	23,11
$I_c(2,1ou 2)$	(A)	9,00	10,60	12,60	14,00	16,40	15,20	17,40	15,50	14,4
$I_c(2,5ou6)$	(A)	9,00	10,60	12,60	14,00	16,40	15,20	17,40	15,50	14,4
$I_c(2,3ou4)$	(A)	4,80	5,95	7,25	8,15	9,70	9,00	10,50	9,40	8,7
$I_c(2,7ou8)$	(A)	4,80	5,95	7,25	8,15	9,70	9,00	10,50	9,40	8,7

BU
LILLE

.../...

$E_r(3,1)$	(V)	13,46	11,90	11,11	10,26	10,43	8,50	8,62	6,54	5,84
$E_r(3,2)$	(V)	13,43	11,84	11,03	10,15	10,31	8,38	8,48	6,44	5,71
$E_r(3,3)$	(V)	13,45	11,89	11,08	10,21	10,38	8,44	8,56	6,49	5,77
$E_r(3,4)$	(V)	13,44	11,86	11,06	10,19	10,36	8,43	8,54	6,48	5,76
$E_r(3,5)$	(V)	13,41	11,85	11,04	10,17	10,33	8,39	8,50	6,44	5,74
$E_r(3,6)$	(V)	13,48	11,90	11,11	10,24	10,42	8,48	8,60	6,54	5,82
$E_r(3,7)$	(V)	13,43	11,86	11,06	10,19	10,36	8,42	8,53	6,47	5,75
$E_r(3,8)$	(V)	13,45	11,88	11,08	10,22	10,38	8,45	8,57	6,50	5,79
$E_r(CC')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,55
$E_r(C'C'')$	(V)	26,88	23,75	22,14	20,42	20,75	16,86	17,10	12,97	11,56
$E_r(3)$	(V)	53,76	47,50	44,28	40,84	41,50	33,72	34,20	25,94	23,11
$I_c(3,1ou2)$	(A)	6,20	7,40	8,80	9,65	11,40	10,50	12,00	10,70	9,90
$I_c(3,5ou6)$	(A)	6,20	7,40	8,80	9,65	11,40	10,50	12,00	10,70	9,90
$I_c(3,3ou4)$	(A)	7,75	9,40	11,40	12,75	15,10	14,10	16,20	14,30	13,5
$I_c(3,7ou8)$	(A)	7,75	9,40	11,40	12,75	15,10	14,10	16,20	14,30	13,5

e) $a = 2$; $g = 2$ BU
LLE

x	0,2	0,266	0,333	0,4	0,466	0,533	0,6	0,666	0,733
J (A)	7	6	5,5	5	5	4	4	3	2,6
$E_r(1,1ou5)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(1,2ou6)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(1,3ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(1,4ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(1)$ (V)	53,80	47,64	44,35	40,92	41,56	33,64	34,28	25,96	23,08
$I_c(1,1)$ (A)	7,20	8,00	9,60	11,00	12,90	12,10	14,00	12,00	11,70
$I_c(1,5)$ (A)	7,20	8,00	9,60	11,00	12,90	12,10	14,00	12,00	11,70
$I_c(1,2)$ (A)	7,40	8,20	10,00	11,20	13,20	12,40	14,20	12,10	11,80
$I_c(1,6)$ (A)	7,40	8,20	10,00	11,20	13,20	12,40	14,20	12,10	11,80
$I_c(1,3)$ (A)	4,50	5,00	6,00	6,70	7,85	7,40	8,30	7,10	6,90
$I_c(1,7)$ (A)	4,50	5,00	6,00	6,70	7,85	7,40	8,30	7,10	6,90
$I_c(1,4)$ (A)	3,60	4,10	5,20	5,80	6,90	6,40	7,40	6,40	6,20
$I_c(1,8)$ (A)	3,60	4,10	5,20	5,80	6,90	6,40	7,40	6,40	6,20
$E_r(2,1ou5)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(2,2ou6)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(2,3ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(2,4ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(2)$ (V)	53,80	47,64	44,35	40,92	41,56	33,64	34,28	25,96	23,08
$I_c(2,1)$ (A)	7,60	8,60	10,45	11,60	14,20	13,10	15,10	12,90	12,60
$I_c(2,5)$ (A)	7,60	8,60	10,45	11,60	14,20	13,10	15,10	12,90	12,60

BU
ILLE

$I_c(2,2)$ (A)	6,00	7,00	8,00	8,75	10,40	9,50	10,80	9,40	9,10
$I_c(2,6)$ (A)	6,00	7,00	8,00	8,75	10,40	9,50	10,80	9,40	9,10
$I_c(2,3)$ (A)	3,00	3,50	4,10	4,60	5,45	5,10	5,80	5,00	4,85
$I_c(2,7)$ (A)	3,00	3,50	4,10	4,60	5,45	5,10	5,80	5,00	4,85
$I_c(2,4)$ (A)	5,90	7,00	8,35	9,50	11,20	10,70	12,00	10,50	10,30
$I_c(2,8)$ (A)	5,90	7,00	8,35	9,50	11,20	10,70	12,00	10,50	10,30
$E_r(3,1ou5)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(3,2ou6)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(3,3ou7)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(3,4ou8)$ (V)	13,45	11,91	11,09	10,23	10,39	8,41	8,57	6,49	5,77
$E_r(3)$ (V)	53,80	47,64	44,35	40,92	41,56	33,64	34,28	25,96	23,08
$I_c(3,1)$ (A)	6,50	7,50	9,20	10,20	12,20	11,20	12,80	10,80	10,60
$I_c(3,5)$ (A)	6,50	7,50	9,20	10,20	12,20	11,20	12,80	10,80	10,60
$I_c(3,2)$ (A)	3,30	3,80	4,50	5,10	5,90	5,60	6,20	5,40	5,15
$I_c(3,6)$ (A)	3,30	3,80	4,50	5,10	5,90	5,60	6,20	5,40	5,15
$I_c(3,3)$ (A)	5,00	5,80	7,05	7,90	9,40	8,80	10,00	8,60	8,35
$I_c(3,7)$ (A)	5,00	5,80	7,05	7,90	9,40	8,80	10,00	8,60	8,35
$I_c(3,4)$ (A)	7,00	8,60	10,00	11,40	13,70	12,70	14,60	12,50	12,40
$I_c(3,8)$ (A)	7,00	8,60	10,00	11,40	13,70	12,70	14,60	12,50	12,40

BU
LILLEf) $a = 2$; $g = 4$

Tableau V.5

Couplage	a=8	a=4 g=1	a=4 g=2	a=2 g=1	a=2 g=2	a=2 g=4
$X_c(1,1)$	48,3	30,5	43	21,7	30,1	42,2
$X_c(1,2)$	80	53,1	71,5	45,8	52	69,4
$X_c(1,3)$	111,6	107,5	100	57,8	106,4	96,4
$X_c(1,4)$	32,3	38,2	28,3	34,1	37,8	27,1
$X_c(1,5)$	40,1	23,7	35,2	16,6	22,5	32,9
$X_c(1,6)$	72,6	45,1	64,5	38,4	42,8	57,8
$X_c(1,7)$	102,2	94,4	91,7	54,3	90,6	84,8
$X_c(1,8)$	23,8	29,1	21,7	32,9	26,4	20
$X_c(2,1)$	68,9	49	61	40	48,6	60,6
$X_c(2,2)$	100,5	56,3	91,6	42,6	55	84
$X_c(2,3)$	86,2	40,1	74,5	1	39	73,5
$X_c(2,4)$	24,2	20,8	22,3	19,3	19,1	20,6
$X_c(2,5)$	63,7	41,9	54,7	33,6	39	49,3
$X_c(2,6)$	89,4	49,1	80,4	37,6	46,1	72,3
$X_c(2,7)$	71,2	32,1	65,2	4,6	29,7	72,3
$X_c(2,8)$	34,1	31,1	30,2	24,3	30,6	28,2
$X_c(3,1)$	87,7	75,1	80	37,6	76,1	76,5
$X_c(3,2)$	116,6	58,1	104,3	46,6	57,4	100
$X_c(3,3)$	5,7	3,8	5	43	2,1	5
$X_c(3,4)$	52,8	38,2	47,6	15,1	36,8	42,9
$X_c(3,5)$	79,3	66,5	70,2	29,5	62,1	64,6
$X_c(3,6)$	107,9	51	94,3	38,7	48	87,5
$X_c(3,7)$	12,3	9	11	38,8	8,4	10,2
$X_c(3,8)$	61,6	47,8	54,5	17,5	46,4	52

Tableau V.6

Les réactances $X_c(q,k)$ sont en $m\Omega$.

Schéma	a	b	c	d	a	b	c	d
$I_c^{(1)}(A)$	13,3	6,7	9,2	14,5				
$I_c^{(2)}(A)$	13,4	14,4	9	6,95				
$I_c^{(3)}(A)$	6,1	11,4	14,8	11,1				
$E_r^{(1)}(V)$	26	26,03	26,03	25,98				
$E_r^{(2)}(V)$	26	26	26,02	26,05				
$E_r^{(3)}(V)$	26	26,02	25,98	26				
Enroulement	$E_r(q,k)(V)$				$X_c(q,k)(m\Omega)$			
1,1	6,7	7,06	6,83	6,5	21,7	74,6	19,6	35,2
1,2	6,72	7,07	6,95	6,65	45,8	43,3	44,6	49
1,3	6,4	6,75	7,06	6,57	57,8	64,1	13,1	42,1
1,4	6,18	6,19	6,64	6,72	34,1	68,6	1,1	4,8
1,5	6,31	6,02	6,21	6,45	16,6	11,9	12	24,1
1,6	6,29	5,99	6,14	6,38	38,4	28,3	36,9	40
1,7	6,59	6,22	5,95	6,43	54,3	49,2	6,5	37,2
1,8	6,8	6,77	6,32	6,23	32,9	59,7	5,4	9,6
2,1	6,74	6,65	6,99	7,02	40	44,4	33,3	38,8
2,2	6,73	6,47	6,77	7,1	42,6	56,9	57,8	27,3
2,3	6,85	6,29	6,26	6,69	1	38,9	65,6	23
2,4	6,52	6,42	6,05	6,19	19,3	10,4	24,4	11,5
2,5	6,31	6,32	6,09	6,07	33,6	31,9	25,6	30,2
2,6	6,32	6,5	6,24	5,94	37,6	47,9	47,8	18,7
2,7	6,12	6,66	6,72	6,28	4,6	33,3	60	14,4
2,8	6,47	6,52	7,01	6,83	24,3	19,4	23,3	4,3
3,1	7,13	6,85	6,57	6,75	37,6	43,9	52,7	54
3,2	6,75	6,97	6,43	6,32	46,6	4,4	39,9	63,1
3,3	6,21	6,58	6,58	6,12	43	11,4	8,8	29,7
3,4	6,06	6,25	6,39	6,2	15,1	25,4	29,1	21,6
3,5	5,97	6,19	6,44	6,27	29,5	35,1	43,9	43,2
3,6	6,25	6,01	6,56	6,67	38,7	0,8	36,5	58,6
3,7	6,83	6,38	6,38	6,92	38,8	18,4	14,2	29,7
3,8	7,07	6,78	6,59	6,86	17,5	34,2	39,2	27,9



Phase 1		Phase 2		Phase 3	
Couplage en parallèle des enroulements de rang k					
impair	pair	impair	pair	impair	pair
$E_r(1) = 6,49V$	$E_r(1) = 6,49V$	$E_r(2) = 6,49V$	$E_r(2) = 6,49V$	$E_r(3) = 6,49V$	$E_r(3) = 6,49V$
$I_c(1,1)=24 \text{ A}$	$I_c(1,2)=26,2 \text{ A}$	$I_c(2,1)=27,4 \text{ A}$	$I_c(2,2)=20,5 \text{ A}$	$I_c(3,1)=24,3 \text{ A}$	$I_c(3,2)=11,9 \text{ A}$
$I_c(1,3)=16,3 \text{ A}$	$I_c(1,4)=11,8 \text{ A}$	$I_c(2,3)= 9,9 \text{ A}$	$I_c(2,4)=19,9 \text{ A}$	$I_c(3,3)=16,3 \text{ A}$	$I_c(3,4)=25,2 \text{ A}$
$I_c(1,5)=23,8 \text{ A}$	$I_c(1,6)=25,2 \text{ A}$	$I_c(2,5)=26,4 \text{ A}$	$I_c(2,6)=20,2 \text{ A}$	$I_c(3,5)=23,5 \text{ A}$	$I_c(3,6)=11,7 \text{ A}$
$I_c(1,7)=15,8 \text{ A}$	$I_c(1,8)=11,2 \text{ A}$	$I_c(2,7)= 9,9 \text{ A}$	$I_c(2,8)=19,7 \text{ A}$	$I_c(3,7)=15,8 \text{ A}$	$I_c(3,8)=25,5 \text{ A}$
$E'(1,2)= 6,67V$	$E'(1,1)= 6,7 \text{ V}$	$E'(2,2)= 6,57V$	$E'(2,1)= 6,7 \text{ V}$	$E'(3,2)= 6,44V$	$E'(3,1)= 6,63V$
$E'(1,4)= 6,34V$	$E'(1,3)= 6,51V$	$E'(2,4)= 6,3 \text{ V}$	$E'(2,3)= 6,4 \text{ V}$	$E'(3,4)= 6,28V$	$E'(3,3)= 6,32V$
$E'(1,6)= 6,31V$	$E'(1,5)= 6,29V$	$E'(2,6)= 6,37V$	$E'(2,5)= 6,3 \text{ V}$	$E'(3,6)= 6,44V$	$E'(3,5)= 6,34V$
$E'(1,8)= 6,57V$	$E'(1,7)= 6,41V$	$E'(2,8)= 6,66V$	$E'(2,7)= 6,51V$	$E'(3,8)= 6,71V$	$E'(3,7)= 6,62V$

BU
LILLE

Tableau V.8

(A) \ x	0,366	0,4	0,433	0,466	0,5	0,533	0,566
Axe polaire dans l'axe du décentrement $F_x = 5300 \text{ N}$	11,9	10,6	9,7	8,8	8,2	7,7	7,2
Axe interpolaire dans l'axe du décentrement $F_x = 5300 \text{ N}$	12,6	11	9,8	9	8,5	8	7,4

0,6	0,633	0,666	0,7	0,733	0,766	0,8
6,7	6,3	5,9	5,5	5,1	4,7	4,4
6,8	6,4	6	5,6	5,2	4,8	4,5



Tableau VI.1

x	0,366	0,4	0,433	0,466	0,5	0,533	0,566
(A) pour $F = 5300 \text{ N}$	12,25	10,8	9,75	8,9	8,35	7,75	7,3

0,6	0,6333	0,666	0,7	0,733	0,766	0,8
6,75	6,35	5,95	5,55	5,15	4,75	4,45

Tableau VI.2

x	0,366	0,4	0,433	0,466	0,5	0,533	0,566
(N) pour $J = 5 \text{ A}$	883	1 136	1 394	1 673	1 900	2 206	2 486
(N) pour $J = 7 \text{ A}$	1 730	2 226	2 730	3 277	3 723	4 321	4 871
(N) pour $J = 9 \text{ A}$	2 861	3 681	4 516	5 420	6 157	7 148	8 056

0,6	0,633	0,666	0,7	0,733	0,766	0,8
2 908	3 286	3 743	4 302	4 996	5 873	6 691
5 697	6 437	7 332	8 427	9 786	11 504	13 108
9 422	10 647	12 126	13 937	16 186	19 027	21 679

Tableau VI.3



x	0,366	0,4	0,433	0,466	0,5	0,533	0,566
J (A)	12,25	10,8	9,75	8,9	8,35	7,75	7,3
F _m (N)	5 300						
E _o (V)	20,75	19	17,5	16,25	15,38	14,32	13,62
F _c (N)	9952	9458	9035	8759	8850	8630	8796
K _f	0,53	0,56	0,58	0,60	0,59	0,61	0,60

0,6	0,633	0,666	0,7	0,733	0,766	0,8
6,75	6,35	5,95	5,55	5,15	4,75	4,45
5 300						
12,62	11,93	11,25	10,5	9,62	8,88	8,37
8566	8685	8809	8847	8608	8572	9075
0,61	0,61	0,60	0,6	0,61	0,61	0,58

Valeur moyenne de K_f=0,59

Tableau VI.4

Couplage	a=8	a=4;g=1	a=4;g=2	a=2;g=1	a=2;g=2	a=2;g=4
J' _A	9,2	8,5	9	4,6	8,1	8,8
ΔF%	90	88,35	89,6	60,25	87,1	89,1

x = 0,666 , J = 2,9 A

Tableau VI.5

B I B L I O G R A P H I E

-O-O-O-O-O-O-

(1) : S. BEN CHAABANE

Influence du décentrement sur l'attraction magnétique radiale et sur les forces électromotrices des machines synchrones

Thèse de Docteur-Ingénieur n°302- 25 juin 1982 - Université des Sciences et Techniques de Lille

(2) : A. BAHRI

Réduction de l'attraction magnétique radiale des machines synchrones par le couplage en parallèle des enroulements statoriques

Thèse de Docteur-Ingénieur n°303 - 25 juin 1982 - Université des Sciences et Techniques de Lille

(3) : A. BAHRI, G. SEGUIER et A. WIART

Réduction de l'attraction magnétique radiale des machines synchrones multipolaires par le couplage en parallèle des enroulements

Rapport sur le contrat n°81-A-0896 avec la DGRST - Mars 1984

(4) : A. BAHRI, S. BEN CHAABANE, G. SEGUIER, M. LECLERCQ

Synchronous machines with high number of poles : reduction of the resultant radial magnetic attraction by suitable connection of the statoric windings

International conference on Electrical Machines - Septembre 1984
Lausanne

(5) : F. NOTELET

Entrefer limité par deux surfaces cylindriques d'axes parallèles : expression des réluctances, applications.

Note à l'Académie des Sciences de Paris. T. 298. Série II. N°11- 1984

(6) : F. NOTELET, G. RAVALITERA

Assesment of the induction motor deduced from the fluctuations of the feeding currents

International conference on electrical machines. Septembre 1984 -
Lausanne.

(7) : G. SEGUIER, F. NOTELET

Electrotechnique Industrielle - Technique et Documentation - Entreprise
moderne d'Edition - 1977.

(8) : J. LESENNE, F. NOTELET et G. SEGUIER

Introduction à l'Electrotechnique Approfondie - Technique et Documen-
tation - 1981.

TABLE DES MATIERES

-O-O-O-O-O-

AVANT-PROPOS

Chapitre 1 - INTRODUCTION	1
I. Présentation du sujet	1
II. Etude bibliographique	3
III. Présentation de notre étude	3
 Chapitre 2 - ETUDE THEORIQUE	 5
I. Relation entre le décentrement et l'attraction magnétique radiale	6
I.1. Variation de l'épaisseur de l'entrefer	6
I.2. Forces magnétomotrices appliquées aux entrefers	7
I.3. Force d'attraction radiale	10
I.3.1. Cas d'une répartition de l'induction en créneaux rectangulaires	10
I.3.2. Cas d'une répartition sinusoïdale de l'induction.	13
II. Influence du décentrement sur les forces électromotrices	15
II.1. Positions géométriques des enroulements statoriques	15
II.2. Forces électromotrices induites dans les sections	17
II.3. Forces électromotrices induites dans les enroulements	19
II.4. Forces électromotrices induites dans les phases	20
III. Réduction de l'attraction radiale	21
III.1. Couplages en parallèle des enroulements	22
III.1.1. Cas général ; couplage avec a voies en parallèle	22
III.1.2. Multiplication du nombre de circuits du courant de circulation	24
III.2. Réduction de l'attraction radiale	25
III.2.1. Première méthode	25
III.2.1.1. Les forces électromotrices de circulation	25
III.2.1.2. Forces magnétomotrices créées par les courants de circulation	26
III.2.2. Deuxième méthode	26
III.2.2.1. Procédé utilisé	27
III.2.2.2. Courbes enveloppes	28
III.2.2.3. Force d'attraction magnétique radiale résultante	29

Chapitre 3 - COMPLEMENTS A L'ETUDE THEORIQUE	33
I. Positions géométriques des enroulements statoriques	34
II. Forces électromotrices	36
II.1. Forces électromotrices induites dans les sections	36
II.2. Forces électromotrices induites dans les enroulements	37
II.3. Forces électromotrices induites dans les phases	38
III. Couplage en parallèle des enroulements	39
 Chapitre 4 - PRESENTATION DE LA MACHINE EXPERIMENTALE	 43
I. Description de la machine expérimentale	43
I.1. Conception générale	44
I.2. Principales caractéristiques	44
I.3. Réalisation du banc d'essais	47
II. Reconnaissance de la machine expérimentale	48
II.1. Les caractéristiques à puissance réduite	49
II.1.1. La caractéristique à vide E_o (J) à N=750T/min	49
II.1.2. La caractéristique en court-circuit I_{cc} (J) à N=750T/min	49
II.2. Détermination des paramètres	51
II.2.1. Résistance R de chaque phase de l'induit	51
II.2.2. Réactances longitudinale X_d et transversale X_q	51
II.2.3. Réactance inverse X_i	53
II.2.4. Réactances subtransitoires longitudinale X''_d et transversale X''_q	53
II.2.5. Réactance homopolaire X_o	55
 Chapitre 5 - ETUDE EXPERIMENTALE	 56
I. Etude des forces électromotrices à vide	56
I.1. Les essais	56
I.2. Les résultats	57
I.3. Vérification - Interprétation des résultats.	58
II. Couplage en parallèle des enroulements statoriques	68
II.1. Les essais	69
II.2. Les tensions	69
II.3. Les courants de circulation	75
II.4. Les réactances limitant les courants de circulation	78
II.5. Remarques	80
II.5.1. Les forces magnétomotrices de circulation	80
II.5.2. Particularités de certains enroulements	90
II.5.3. Permutation des enroulements de chaque phase	90
II.5.4. Couplage partiel des enroulements de chaque phase	93

Chapitre 6 - MESURE DE LA FORCE D'ATTRACTION MAGNETIQUE RADIALE ET DETERMINATION DE SA REDUCTION	97
I. Mesure de la force d'attraction magnétique radiale	97
I.1. Variation du courant d'excitation J en fonction du décentrement relatif x à force d'attraction donnée	98
I.2. Variation de la force d'attraction F en fonction du décentrement relatif x à courant d'excitation J donné	100
I.3. Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux	100
II. Détermination de la réduction de la force d'attraction magnétique radiale	103
 Chapitre 7 - CONCLUSION	 106
 ANNEXE	 113
BIBLIOGRAPHIE	
Table des matières	

